

УДК 631.362.3

Д.І. Петренко, доц., канд. техн. наук, О.М. Васильковський, доц., канд. техн. наук, С.М. Лещенко, доц., канд. техн. наук, О.В. Нестеренко, асист.

Кіровоградський національний технічний університет

Ефективність розділення зернового матеріалу на фракції турбінним сепаратором

В статті авторами висвітлено проблему оптимізації параметрів пневматичних сепараторів для очищення і сортування зерна. Отримані аналітичні залежності дозволяють дослідити процес розділення зернової суміші на фракції і теоретично встановити необхідні параметри сепаруючої системи. Аналіз траєкторій переміщення часток суміші в вертикальному пневмоканалі кільцевого типу дозволяє зробити висновок, що в турбінному сепараторі можна ефективно виділяти із зернової суміші легкі домішки, при цьому лише незначна їх частина може потрапити в повноцінне зерно.

теоретична ефективність розділення, зернова суміш, повітряний канал, пневмоканал кільцевого типу, турбінний сепаратор, фракції

Д.И. Петренко, А.М. Васильковский, С.Н. Лещенко, А.В. Нестеренко

Кировоградский национальный технический университет

Эффективность разделения зернового материала на фракции турбинным сепаратором

В статье авторами освещена проблема оптимизации параметров пневматических сепараторов для очистки и сортировки зерна. Полученные аналитические зависимости позволяют исследовать процесс разделения зерновой смеси на фракции и теоретически установить необходимые параметры сепарирующей системы. Анализ траекторий перемещения частиц смеси в вертикальном пневмоканале кольцевого типа позволяет сделать вывод, что в турбинном сепараторе можно эффективно выделять из зерновой смеси легкие примеси, при этом лишь незначительная их часть может попасть в полноценное зерно.

теоретическая эффективность разделения, зерновая смесь, воздушный канал, пневмоканал кольцевого типа, турбинный сепаратор, фракции

Сучасний розвиток аграрного сектору України вимагає розробки і виготовлення технічних засобів, які б дозволили не лише виростити і зібрати гарний врожай, а й зберегти його.

Післязбиральна обробка вирішує дві основні взаємопов'язані задачі – забезпечує довготривале зберігання зерна і доведення його до встановлених кондицій. Для вирішення цих задач використовують різні способи, головним з яких є сушіння в зерносушарках і очистка зернового матеріалу від домішок з наступним сортуванням.

Останнім часом все більшої популярності для розділення зернових сумішей на фракції набувають турбінні пневмосепаратори з кільцевим перерізом вертикального пневмоканалу (ПСК) [1, 2, 3]. При цьому їх параметри підбираються “інтуїтивним” (конструктивним) шляхом з подальшою перевіркою за допомогою проведення серії дослідів, що вимагає значних витрат коштів і часу.

Тому актуальною є розробка математичного апарату, який би дозволив визначати раціональні параметри турбінного пневмосепаратора для забезпечення максимальної продуктивності при дотриманні агрономічних вимог.

Для визначення раціональних параметрів вказаного сепаратора необхідно розглянути сили, що діють на частинки суміші при їх русі в повітряному потоці.

Розглянемо схему роботи ПСК з вертикальним повітряним потоком, який діє на оброблюваний матеріал зі швидкістю V_{cp} під кутом до горизонту β , а зерновий матеріал вводиться в канал з початковою швидкістю V_0 під кутом α_0 (рис. 1).

При цьому початок координат помістимо в точку потрапляння частини в повітряний потік. Рух частки будемо розглядати, виходячи з другого закону Ньютона [4].

На частинку масою m (рис.1) діє сила тяжіння $G = m \cdot g$, сила опору повітряного потоку R , яку при турбулентному режимі руху повітря можна визначити за формулою [5]

$$R = k \cdot F \cdot \frac{\rho \cdot V_B^2}{2}, \quad (1)$$

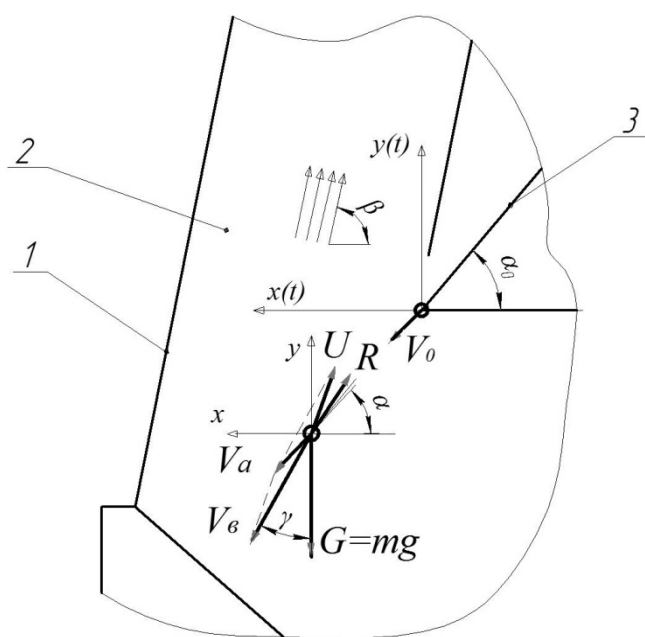
де k – коефіцієнт аеродинамічного опору;

F – міделевий переріз частинки, m^2 ;

ρ – густина середовища, kg/m^3 ;

V_B – відносна швидкість частинки, m/s ;

g – прискорення вільного падіння, m/s^2 .



1 – корпус сепаратора; 2 – ПСК; 3 – поверхня розподільника.

Рисунок 1 – Схема взаємодії повітряного потоку з частинкою зернової суміші

В свою чергу відомо, що коефіцієнт парусності

$$k_{\Pi} = \frac{kF\rho}{2m}. \quad (2)$$

Підставивши (2) в (1) запишемо

$$R = k_{II} \cdot m \cdot V_B^2. \quad (3)$$

В проекціях на обрані осі OX і OY (рис. 1) одержимо систему диференціальних рівнянь

$$\begin{cases} m\ddot{x} = -R \sin \gamma; \\ m\ddot{y} = R \cos \gamma - G, \end{cases} \quad (4)$$

де γ – кут між віссю OY і напрямком сили опору повітряного потоку, град.

Підставивши вираз (3), та розписавши силу тяжіння G в систему рівнянь (4), скоротивши останню на m маємо:

$$\begin{cases} \ddot{x} = -k_{II} V_B^2 \sin \gamma; \\ \ddot{y} = k_{II} V_B^2 \cos \gamma - g, \end{cases} \quad (5)$$

Враховуючи залежність для абсолютної швидкості частинки

$$\overline{V}_A = \overline{U} + \overline{V}_B \quad (6)$$

Представимо абсолютну швидкість частинки в проекціях на осі координат

$$\begin{cases} V_A \cos \alpha = -U \cdot \cos \beta + V_B \cdot \sin \gamma; \\ -V_A \sin \alpha = U \cdot \sin \beta - V_B \cdot \cos \gamma. \end{cases} \quad (7)$$

де U – середня швидкість вертикального повітряного потоку, м/с;

β – кут нахилу повітряного потоку до горизонту, град.

Виходячи з системи рівнянь (7) можемо записати

$$\begin{cases} V_B \cdot \sin \gamma = V_A \cos \alpha + U \cdot \cos \beta; \\ V_B \cdot \cos \gamma = V_A \sin \alpha + U \cdot \sin \beta. \end{cases} \quad (8)$$

Підставивши (8) в (5) та врахувавши, що $V_A \cos \alpha = \dot{x}$, $V_A \sin \alpha = \dot{y}$ маємо систему

$$\begin{cases} \ddot{x} + k_{II} \cdot V_B \dot{x} = -U \cdot \cos \beta \cdot k_{II} \cdot V_B; \\ \ddot{y} - k_{II} \cdot V_B \dot{y} = U \cdot \sin \beta \cdot k_{II} \cdot V_B. \end{cases} \quad (9)$$

Отже, задача зводиться до розв'язування системи двох неоднорідних диференціальних рівнянь другого порядку при початкових умовах

$$x(0) = 0, \quad \dot{x}(0) = V_{A_0} \cos \alpha, \quad y(0) = 0, \quad \dot{y}(0) = V_{A_0} \sin \alpha. \quad (10)$$

Розв'язок кожного з рівнянь шукається у вигляді [6]

$$x = x_{zp} + x_{\text{чп}}, \quad y = y_{zp} + y_{\text{чп}} \quad (11)$$

де $x_{\text{зп}} = C_1 + C_2 e^{-k_{\text{п}} V_{B_0} t}$, $y_{\text{зп}} = C_3 - C_4 e^{-k_{\text{п}} V_{B_0} t}$ – загальні розв’язки відповідних однорідних рівнянь; C_1, C_2, C_3, C_4 – сталі інтегрування;

$x_{\text{чп}} = -U \cos \beta \cdot t$; $y_{\text{чп}} = \left(U \sin \beta - \frac{g}{k_{\text{п}} V_{B_0}} \right) \cdot t$ – довільні часткові розв’язки неоднорідних рівнянь.

Таким чином, розв’язок системи (9) має вигляд

$$\begin{cases} x = C_1 + C_2 e^{-k_{\text{п}} V_{B_0} t} - U \cos \beta \cdot t; \\ y = C_3 - C_4 e^{-k_{\text{п}} V_{B_0} t} + \left(U \sin \beta - \frac{g}{k_{\text{п}} V_{B_0}} \right) \cdot t, \end{cases} \quad (12)$$

З умов (12) знаходимо сталі інтегрування

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{(V_{A_0} \cos \alpha + U \cos \beta)}{k_{\text{п}} V_{B_0}}, \\ C_2 &= \frac{-(V_{A_0} \cos \alpha + U \cos \beta)}{k_{\text{п}} V_{B_0}}, \\ C_3 &= \frac{(U \sin \beta - \frac{g}{k_{\text{п}} V_{B_0}} - V_{A_0} \sin \alpha)}{k_{\text{п}} V_{B_0}}, \quad C_3 = C_4. \end{aligned}$$

Підставивши C_1, C_2, C_3, C_4 в рівняння (12), отримаємо закон руху зерна в параметричному вигляді

$$\begin{cases} x = (e^{-k_{\text{п}} V_{B_0} t} - 1) (-V_{A_0} \cos \alpha_0 - U \cos \beta) / k_{\text{п}} V_{B_0} - U \cos \beta \cdot t; \\ y = (e^{-k_{\text{п}} V_{B_0} t} - 1) \left(\frac{g}{k_{\text{п}} V_{B_0}} - U \sin \beta + V_{A_0} \sin \alpha_0 \right) / k_{\text{п}} V_{B_0} + \left(U \sin \beta - \frac{g}{k_{\text{п}} V_{B_0}} \right) \cdot t, \end{cases} \quad (13)$$

де V_{A_0} – абсолютна швидкість потрапляння частинки в вертикальний повітряний потік в початковий момент часу, м/с;

V_{B_0} – відносна швидкість частинки в момент потрапляння її в вертикальний повітряний потік, м/с.

Відносна швидкість частинки в момент потрапляння її в вертикальний повітряний потік визначається із векторного рівняння (6) і за теоремою косинусів можна записати

$$V_{B_0} = \sqrt{V_{A_0}^2 + U^2 - 2V_{A_0} U \cos(\alpha_0 + \beta)}. \quad (14)$$

Тоді в проекціях на осі координат абсолютне переміщення частинки в потоці виражається рівнянням

$$\left\{ \begin{aligned}
 x &= \left(e^{-k_{\Pi} \sqrt{V_{A_0}^2 + U^2 - 2V_{A_0} U \cos(\alpha_0 + \beta)} \cdot t} - 1 \right) \frac{(-V_{A_0} \cos \alpha_0 - U \cos \beta)}{k_{\Pi} \sqrt{V_{A_0}^2 + U^2 - 2V_{A_0} U \cos(\alpha_0 + \beta)}} - U \cos \beta \cdot t; \\
 y &= \left(e^{-k_{\Pi} \sqrt{V_{A_0}^2 + U^2 - 2V_{A_0} U \cos(\alpha_0 + \beta)} \cdot t} - 1 \right) \times \\
 &\times \left(\frac{U \sin \beta - \frac{g}{k_{\Pi} \sqrt{V_{A_0}^2 + U^2 - 2V_{A_0} U \cos(\alpha_0 + \beta)}} - V_{A_0} \sin \alpha_0}{k_{\Pi} \sqrt{V_{A_0}^2 + U^2 - 2V_{A_0} U \cos(\alpha_0 + \beta)}} \right) + \\
 &+ \left(U \sin \beta - \frac{g}{k_{\Pi} \sqrt{V_{A_0}^2 + U^2 - 2V_{A_0} U \cos(\alpha_0 + \beta)}} \right) \cdot t.
 \end{aligned} \right. \quad (15)$$

Відмітимо, що система рівнянь (15) являє собою параметричне рівняння траєкторії руху частинки зернової суміші в вертикальному повітряному потоці і може застосовуватися для побудови траєкторії її руху при різних швидкостях витання (коефіцієнтах парусності), в залежності від початкових умов V_{A_0} , $V_{кр}$, α_0 , β .

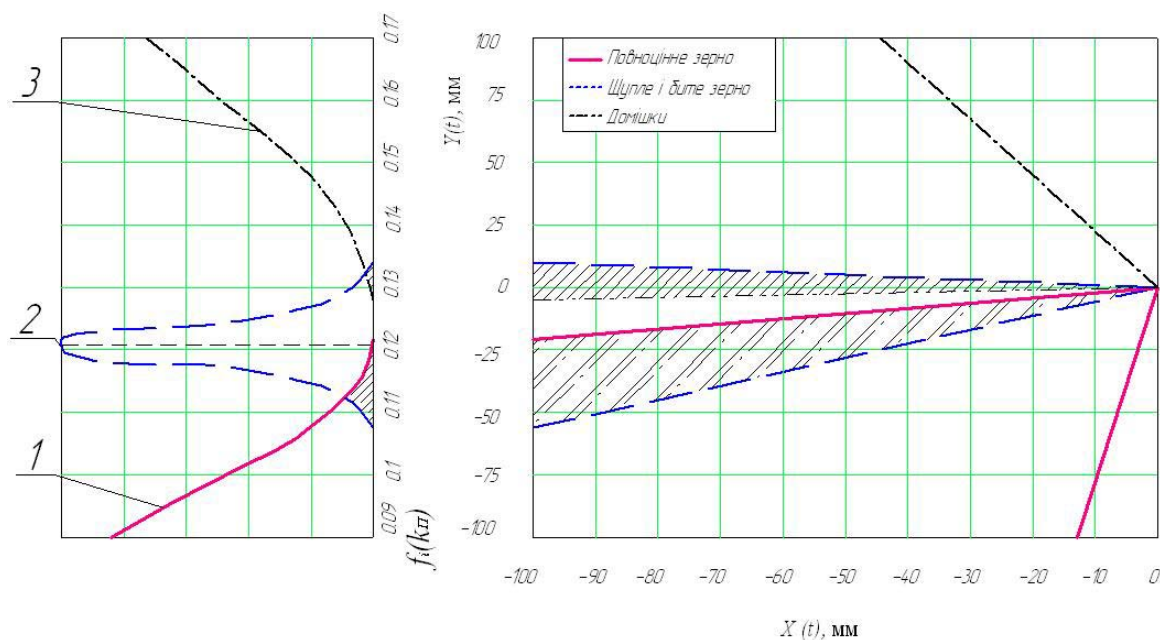
Згідно з рекомендаціями А.Я. Маліса, А.Р. Демидова, А.І. Буркова, Н.П. Сичугова, С.М. Лещенка та інших авторів [7, 8, 9], раціональними умовами введення матеріалу в вертикальний повітряний потік є: кут введення матеріалу $\alpha_0 = 30 - 50^\circ$, кут нахилу повітряного потоку до горизонту (осі ОХ) $\beta = 50 - 80^\circ$, швидкість повітряного потоку приблизно рівна швидкості витання зернового матеріалу, що очищається $U = (0,8 - 0,9)V_{кр}$, а початкова швидкість введення матеріалу $V_{A_0} = 0,2 - 0,5$ м/с.

Для наведених початкових умов доцільно побудувати траєкторії руху частин зернової суміші при потраплянні в вертикальний повітряний потік в результаті очистки різних культур. При цьому значення глибини каналу приймається згідно рекомендації [9]. Значення швидкостей витання (коефіцієнтів парусності) для різних частин зернової суміші різноманітні [11]. На рис. 2, на прикладі зерна пшениці, наведені графіки траєкторії руху частин зернової суміші в вертикальному повітряному потоці, які побудовані відповідно отриманої залежності (15).

При цьому кожна частинка зернової суміші рухається за своєю траєкторією в залежності від її критичної швидкості (швидкості витання) $V_{кр}$ чи коефіцієнта парусності k_{Π} . Однак, слід відмітити, що в загальній зерновій суміші частинки з різними коефіцієнтами парусності k_{Π} розподілені нерівномірно. Виходячи з результатів попередніх досліджень [12] найбільш відповідним для природних розподілів параметрів випадкових величин підходить нормальний закон (Гауса) $f_i(k_{\Pi})$ (рис. 2)

$$f_i(k_{\Pi}) = \frac{1}{\sigma_{k_{\Pi_i}} \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(k_{\Pi} - \bar{k}_{\Pi_i})^2}{2\sigma_{k_{\Pi_i}}^2}}, \quad (16)$$

де $i = 1, 2, 3 \dots n$ – порядковий номер фракції при розділенні суміші.



1 – $f_1(k_n)$ – повноцінне зерно; 2 – $f_2(k_n)$ – щупле і бите зерно;
 3 – $f_3(k_n)$ – легкі домішки ($\alpha_0 = 50^\circ$, $\beta = 80^\circ$, $V_{cp} = 6$ м/с, $V_{A_0} = 0,35$ м/с)

Рисунок 2 – Траєкторії і розподіл за фракціями зернової суміші

Згідно [13] значення коефіцієнтів парусності для основних фракцій при розділенні зернової суміші знаходиться в межах:

$$0,075 \leq k_{II} \leq 0,12 \text{ – повноцінне зерно;}$$

$$0,11 \leq k_{II} \leq 0,14 \text{ – щупле і бите зерно;}$$

$$0,125 \leq k_{II} \leq 0,55 \text{ – домішки.}$$

В рівнянні для розрахунку дальності польоту частинки зернового матеріалу вздовж осі OX (рис. 1) залишається одна змінна величина k_{II} розподілена по нормальному закону розподілу.

В цьому випадку траєкторії руху частинок представляють собою випадковий процес, що описує динаміку руху зернової суміші. Окрема траєкторія є одиничною реалізацією цього процесу.

Так як в основі дослідження розподілу частинок зернової суміші на фракції покладена дальність і висота їх польоту по осям, то обчислення при статистичному моделюванні приведені для параметрів X та Y згідно формули (15).

Статистичним моделюванням при багатократному повторенні процедури розрахунку обчислення траєкторії побудовані криві розподілу $\varphi_i(x)$ випадкових величин – дальності і висоти польоту для різних фракцій зернового матеріалу (рис. 2).

Таким чином на основі статистичного моделювання процесу сепарації зернової суміші на фракції встановлені загальні закономірності розподілу частинок в повітряному потоці.

Аналізі траєкторій переміщення часток суміші (рис. 2) дозволяє зробити висновок, що за допомогою вертикального повітряного потоку можна виділяти із зернової суміші легкі домішки, при цьому лише незначна їх частина може потрапити в повноцінне зерно. Траєкторія руху неповноцінного (щуплого, битого) зерна частково збігається з траєкторією руху повноцінного зерна та легких домішок. Тому в залежності від вимог до очищення (попереднє, первинне чи вторинне), при вказаних початкових умовах, та з врахуванням можливості сепарації різних культур, виникає

необхідність додаткового регулювання пневмосепаратора. Таким чином, аналіз траєкторії руху часток зернової суміші дозволяє визначити конструктивні параметри вертикального ПСК.

Список літератури

1. Котов Б. І. Тенденції розвитку конструкцій машин та обладнання для очищення і сортування зерноматеріалів / Б. І. Котов, С. П. Степаненко, М. Г. Пастушенко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. – Кіровоград. – 2003. – Вип. 33. – С. 53–59.
2. Степаненко С. П. Дослідження процесу пневматичної сепарації насіння в кільцевому зигзагоподібному сепараторі / С. П. Степаненко // Механізація сільськогосподарського виробництва. – Харків : ХНТУСГ. – 2008. – С. 59–65.
3. Васильковський О.М. Підвищення ефективності повітряного очищення зерна / О.М. Васильковський, Д.І. Петренко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Вип. 35. – Кіровоград : КНТУ, 2005. – С. 286–288.
4. Єжов С.М. Класична механіка / С.М.Єжов, М.В. Макарець, О.В. Романенко. – К.: ВПЦ "Київський університет", 2008. – 480 с.
5. Барский М.Д. Оптимизация процессов разделения зерновых материалов / М.Д. Барский. – М.: Недра, 1978. – 163 с.
6. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1973.
7. Лещенко С.М. Обґрунтування параметрів пневмосепаруючої системи інерційного прямооточного сепаратора зерна : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.05.11 „Машини та засоби механізації сільськогосподарського виробництва” / С. М. Лещенко. – Кіровоград, 2010. – 21 с.
8. Малис А. Я. Машины для очистки зерна воздушным потоком / А. Я. Малис, А. Р. Демидов. – М. : Машгиз, 1962. – 175 с.
9. Бурков А.И. Зерноочистительные машины. Конструкция, исследование, расчет и испытание / А.И. Бурков, Н.П. Сычугов. – Киров : Изд-во НИИСХ Северо-Восток, 2000. – 258 с.
10. Безручкин И. П. Исследование аэродинамических свойств зерен в вертикальном потоке / И. П. Безручкин // Сельскохозяйственная машина. – 1936. – № 3. – С.16–22.
11. Теоретичне дослідження якості пневмосепарації зернових сумішей в похилому повітряному потоці / О.М. Васильковський, С.М. Лещенко, Д.І. Петренко [та ін.] // Сільськогосподарські машини: Зб. Наук. Ст. – Вип. 21. – Том 1. – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛНТУ, 2011. – С. 249–254.
12. Дослідження роботи пневмосепаруючого каналу на фізичній моделі / М. І. Васильковський, О. М. Васильковський, С. М. Лещенко [та ін.] // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. – Кіровоград. – 2006. – Вип.17. – С. 44–48.
13. Васильковський О. М. Результати експериментальних досліджень відцентрово-пневматичного сепаратора зерна / О. М. Васильковський, Д. І. Петренко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. – Кіровоград : КНТУ. – 2006. – Вип. 36. – С. 54–56.

D. Petrenko, A. Vasilkovskiy, S. Leshchenko, A. Nesterenko

Kirovograd National Technical University

Separation efficiency of the grain material into fractions separator turbine

The article considers the problem of optimizing the parameters pneumatic separators for cleaning and grading grain. To do this, theoretically studied the interaction of the cereal mixture and air flow in a vertical annular channel pneumatic type. The analytical dependence allows us to study the process separation of the cereal mixture into fractions and theoretically set the parameters separating system. Analysis of the trajectories of particles moving in a vertical mixture pneumatic channel ring type allows us to conclude that in the turbine separator can be effectively isolated from the cereal mixture light impurities, and only a small part of them can get into the full grain. Thus, the analysis trajectories cereal mixture allows determine the design parameters of the turbine separator at the stage designing.

theoretical separation efficiency, cereal mixture, pneumatic channel ring, turbine separator, fraction

Одержано 21.11.13