

О.М. Васильковський, доц., канд. техн. наук, В.В. Гончаров, доц., канд. фіз.-мат. наук, Д.І. Петренко, канд. техн. наук, С.М. Лещенко, доц., канд. техн. наук  
*Кіровоградський національний технічний університет*

## Аналітичне дослідження якості розділення зерноsumіші відцентрово-пневматичним сепаратором

Означені проблемні питання підготовки зернового матеріалу до зберігання. Наведені результати математичного моделювання процесу переміщення частки по зовнішній прутковій поверхні обертального барабана в пневматичному каналі. Використовуючи графоаналітичний метод дослідження визначена теоретична якість розділення зерноsumіші на компоненти відцентрово-пневматичним сепаратором.

**відцентрово-пневматичний сепаратор, циліндричний барабан, пруткова поверхня, теоретична якість розділення**

Аграрний сектор України в останні роки нарощує об'єми виробництва, зокрема в 2011 році зібрано рекордний, близько 50 млн. т., врожай зернових культур [1]. Але здавалося б позитивний результат породив проблему отримання аграріями необхідного прибутку, оскільки велика пропозиція породжує низьку ціну. На перший план в цьому випадку виходить необхідність збереження з мінімальними питомими витратами зібраного врожаю до періоду, коли запропонована ціна задовольнить виробника. Для зберігання зерна потрібно довести його до базисних кондицій по чистоті і вологості.

При зберіганні зерно псується шкідниками, тобто вигризене зсередини. Зерно має при цьому однакові розміри і різну вагу, тобто через решето буде просіюватись і погане зерно (неповноцінне) і нормальне зерно. Решітні машини в цій ситуації не забезпечують необхідну якість очищення. Тому необхідно застосувати розділення за аеродинамічними властивостями.

Відомі два види сепараторів – це пневмостоли і пневматичні сепаратори різного виду. Пневмостоли – дуже важкі в налагодженні, дуже коштовні і мало застосовуються для невеликих господарств. У існуючих найбільш простих пневматичних сепараторів малоефективні пневмоканали [2, 3].

Тому запропоновано новий підхід до аеродинамічного розділення, який полягає в тому, що поєднуються обертальний барабан з прутковою поверхнею та повітряний потік, який проходить через пневмоканал і поверхню барабана [4].

Дослідження роботи запропонованого відцентрово-пневматичного сепаратора представлено в роботі [5]. Зокрема складена функціональна схема переміщення частки по зовнішній прутковій поверхні (рис. 1) та знайдена закономірність її переміщення в каналі:

$$\kappa = b_1 e^{-a\varphi} + a_1 \sin \varphi + a_2 \cos \varphi - 2be^{-a\varphi} \int_{\varphi_0}^{\varphi} \frac{f_1(k_d + \sin \varphi) + \cos \varphi}{\sqrt{1 + k_d^2 + 2k_d \sin \varphi}} e^{a\varphi} d\varphi. \quad (1)$$

$$\text{де } a_1 = 2 \frac{a - f_1}{1 + a^2}; \quad a_2 = -2 \frac{f_1 a + 1}{1 + a^2}; \quad b = \frac{k_{\pi} U^2}{g}; \quad b_1 = \left( \frac{\dot{\phi}_0^2 R}{g} - a_1 \sin \varphi_0 - a_2 \cos \varphi_0 \right) e^{\alpha \varphi_0};$$

$$a = 2(k_{\pi} R - f_1); \quad k_d = \frac{R}{L}; \quad L = l_1 + l_2; \quad f_1 = \frac{f}{\sin \beta} \text{sign}(\dot{\phi} - \omega_D);$$

$$\sin \beta = \sqrt{1 - \left( \frac{d_{\text{np}} + \Delta}{d_{\text{np}} + d_e} \right)^2}; \quad \kappa - \text{показник кінематичного режиму частки; } \varphi - \text{кут, що}$$

визначає положення частки на барабані, град;  $f$  – коефіцієнт тертя ковзання;  $\omega_D$  – кутова швидкість обертання барабана,  $\text{с}^{-1}$ ;  $U$  – швидкість повітряного потоку,  $\text{м/с}$ ;  $k_{\pi}$  – коефіцієнт парусності частки,  $\text{м}^{-1}$ ;  $d_{\text{np}}$  – діаметр прутка,  $\text{м}$ ;  $d_e$  – еквівалентний діаметр зернини,  $\text{м}$ ;  $\Delta$  – зазор між прутками,  $\text{м}$ ;  $l_1$  – відстань між віссю обертання барабана та вхідним колектором повітряного каналу,  $\text{м}$ ;  $l_2$  – довжина сліду повітряного потоку при розширенні каналу,  $\text{м}$ .

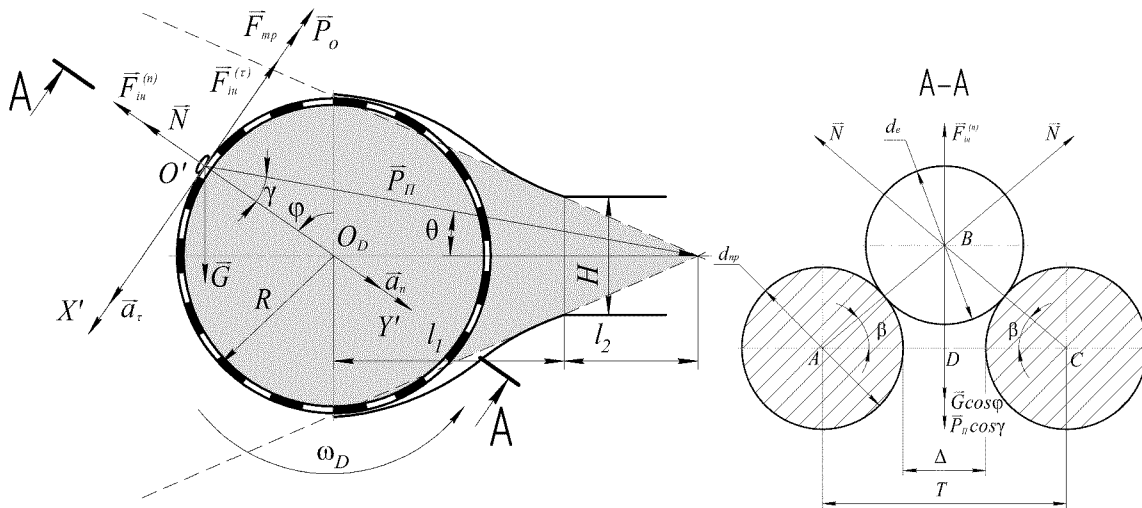


Рисунок 1 – Схема сил, які діють на частку при її русі по зовнішній поверхні циліндричного барабана

Отримане рівняння (1) не підлягає інтегруванню в елементарних функціях, тому для його вирішення був розроблений алгоритм покрокового розв'язку, який реалізований в пакеті прикладних програм MathCAD.

Алгоритм розв'язування наступний.

- 1) Задаємо параметри задачі  $\varphi_0$ ,  $f$ ,  $R$ ,  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $U$ ,  $d_{\text{np}}$ ,  $d_e$ ,  $\Delta$ ,  $V_0$ ,  $\omega_D$ .
- 2) Задаємо крок по часу  $\Delta t$
- 3) Знаходимо мінімальний кут  $\varphi = \varphi_m$ , при якому можна подавати зерновий потік. Рівняння для знаходження кута  $\varphi_m$

$$-(k_{\pi} R - f_1) \frac{V_0^2}{gR} + \sin \varphi_m - f_1 \cos \varphi_m - \frac{k_{\pi} U^2}{g} \frac{f_1 (k_d + \sin \varphi_m) + \cos \varphi_m}{\sqrt{1 + k_d^2 + 2k_d \sin \varphi_m}} = 0. \quad (2)$$

Згідно отриманого рівняння будемо графік залежності кута введення матеріалу до повітряного каналу  $\varphi_m$  від коефіцієнта парусності  $k_{\pi}$  (рис. 2) (на прикладі зерноsumіші соняшника).

Значення діапазону коефіцієнтів парусності приймаємо згідно рекомендацій [2, 3]:  
 повноцінне насіння –  $k_{\Pi} = 0,07...0,18$ ; некондиційне насіння –  $k_{\Pi} = 0,14...0,32$ ;  
 домішки –  $k_{\Pi} = 0,23...0,55$ .

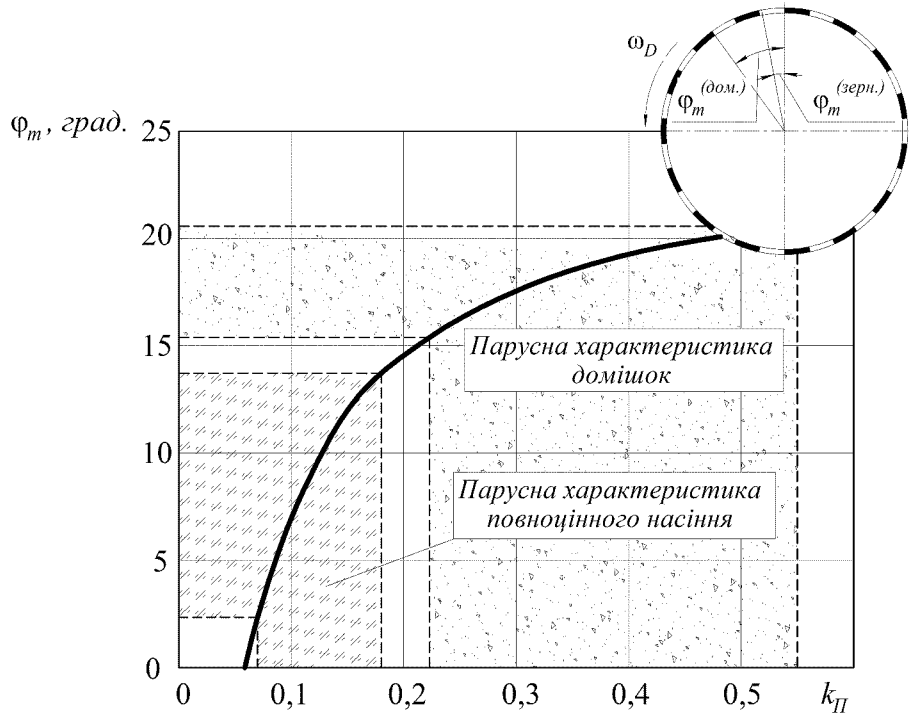


Рисунок 2 – Залежність кута введення матеріалу в повітряний канал від коефіцієнтів парусності елементів (на прикладі зерносуміші соняшника)

Аналіз залежності (рис. 2) показує, що мінімальний кут подачі по дузі кола барабана становить:

для коефіцієнтів парусності  $k_{\Pi} = 0,07...0,18$  –  $\varphi_m = 3^\circ...13^\circ$ ;

для коефіцієнтів парусності  $k_{\Pi} = 0,23...0,55$  –  $\varphi_m = 15^\circ...21^\circ$ .

Для забезпечення стабільного руху з прискоренням, для даних початкових умов, необхідний кут подачі зернового матеріалу складає  $\varphi_m > 21^\circ$ . Зменшення кута введення призведе до уповільнення швидкості руху частки, переміщення в протилежному напрямку, і, відповідно, накопичення матеріалу в зоні подачі. Збільшення кута подачі призведе до зменшення якості очищення внаслідок зменшення зони дії повітряного потоку.

4) Знаходимо кут  $\varphi = \varphi_{\omega_D}$ , при якому швидкість зернини вирівнюється з швидкістю барабана, з рівняння

$$b_1 e^{-\alpha \varphi_{\omega_D}} + a_1 \sin \varphi_{\omega_D} + a_2 \cos \varphi_{\omega_D} - 2b e^{-\alpha \varphi_{\omega_D}} \int_{\varphi_0}^{\varphi_{\omega_D}} \frac{f_1(k_d + \sin \varphi_{\omega_D}) + \cos \varphi_{\omega_D}}{\sqrt{1 + k_d^2 + 2k_d \sin \varphi_{\omega_D}}} e^{\alpha \varphi_{\omega_D}} d\varphi_{\omega_D} - \frac{g}{R} \omega_D^2 = 0. \quad (3)$$

Згідно отриманого рівняння будемо графік залежності кута зміни напрямку

сили тертя  $\varphi_{\omega_D}$  від коефіцієнта парусності  $k_{\Pi}$  (рис. 3).

Отримана графічна залежність (рис. 3) свідчить про те, що домішки мають більше прискорення ніж зерно, і відповідно кут, при якому відбудеться вирівнювання кутової швидкості часток зернового матеріалу і поверхні циліндричного барабана (кут зміни напрямку сили тертя) становитиме:

для коефіцієнтів парусності  $k_{\Pi} = 0,07 \dots 0,18$  –  $\varphi_{\omega_D} = 70^\circ \dots 129^\circ$ ;

для коефіцієнтів парусності  $k_{\Pi} = 0,14 \dots 0,32$  –  $\varphi_{\omega_D} = 57^\circ \dots 76^\circ$ ;

для коефіцієнтів парусності  $k_{\Pi} = 0,23 \dots 0,55$  –  $\varphi_{\omega_D} = 49^\circ \dots 65^\circ$ .

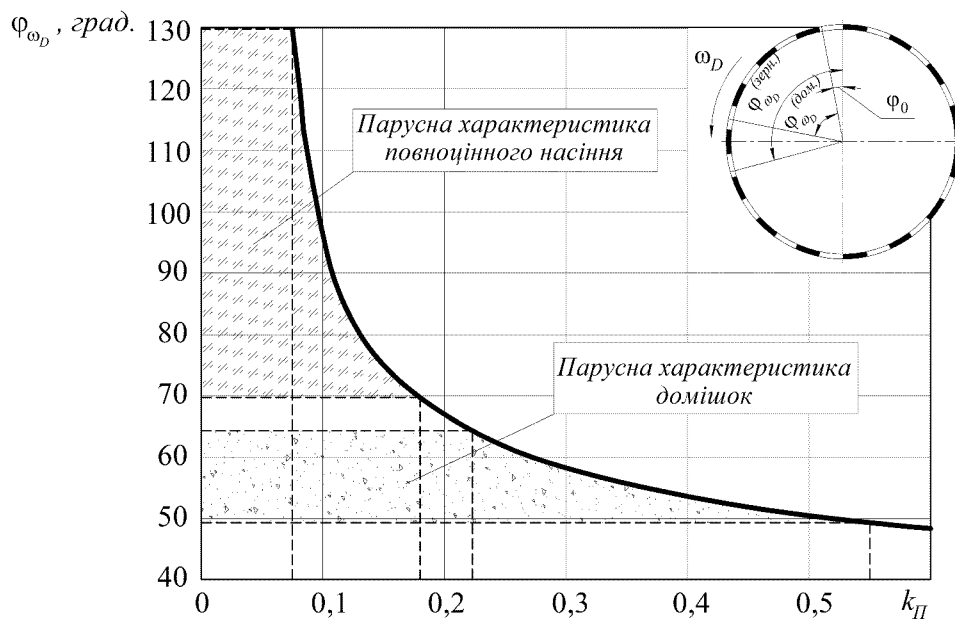


Рисунок 3 – Залежність кута зміни напрямку сили тертя від коефіцієнтів парусності елементів зерноsumіші

Таке розшарування матеріалу відбувається внаслідок дії на частки домішок більшої притискної сили (більший коефіцієнт парусності).

5) Знаходимо кут  $\varphi = \varphi_{\text{відр.}}$  відриву зернини від барабана

$$\frac{k_{\Pi} U^2}{g} \frac{k_d + \sin \varphi_{\text{відр.}}}{\sqrt{1 + k_d^2 + 2k_d \sin \varphi_{\text{відр.}}}} + \cos \varphi_{\text{відр.}} - \frac{R}{g} \dot{\varphi}_{\text{відр.}}^2 < 0$$

(4)

)

або

$$\frac{k_{\Pi} U^2}{g} \frac{k_d + \sin \varphi_{\text{відр.}}}{\sqrt{1 + k_d^2 + 2k_d \sin \varphi_{\text{відр.}}}} + \cos \varphi_{\text{відр.}} - b_1 e^{-\alpha \varphi_{\text{відр.}}} - a_1 \sin \varphi_{\text{відр.}} - a_2 \cos \varphi_{\text{відр.}} +$$

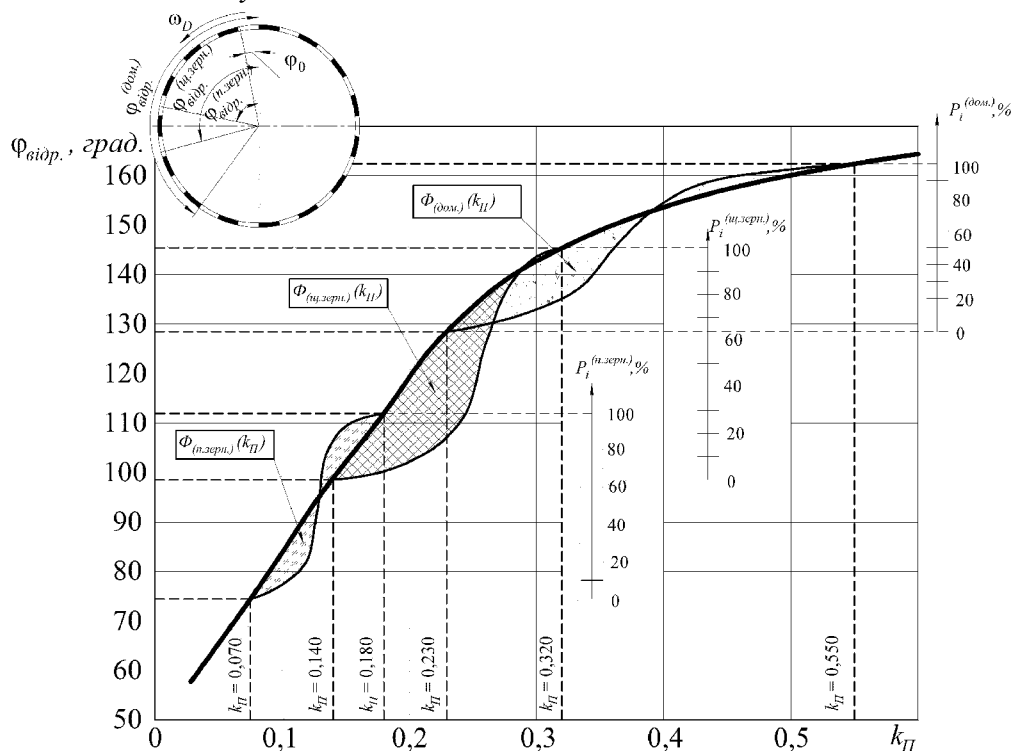
$$+2be^{-\alpha\varphi_{\text{відр.}}} \int_{\varphi_0}^{\varphi_{\text{відр.}}} \frac{f_1(k_d + \sin \varphi_{\text{відр.}}) + \cos \varphi_{\text{відр.}}}{\sqrt{1+k_d^2 + 2k_d \sin \varphi_{\text{відр.}}}} e^{\alpha\varphi_{\text{відр.}}} d\varphi_{\text{відр.}} = 0, \quad (5)$$

$$\Delta \in b_1 = \left( \frac{\dot{\varphi}_0^2 R}{g} - a_1 \sin \varphi_0 - a_2 \cos \varphi_0 \right) e^{\alpha\varphi_0}, \quad (6)$$

$\varphi_0 = \max(\varphi_{\omega_D})$  – кут початку прискорення більший за кут п. 4).

Наступним етапом роботи було теоретичне визначення якості повітряного розділення зерноsumіші на компоненти. Для цього на теоретичну криву, яка характеризує залежність кутів відриву часток від значення коефіцієнта парусності, були накладені інтегральні криві розподілу фракцій за аеродинамічними властивостями (рис. 4). Ці криві ідентифікують елементи зерноsumіші як легкі домішки, некондиційне та повноцінне зерно. Місце поділу фракцій визначає зона перетину інтегральних кривих.

Для зернової маси, що характеризується значеннями  $k_{\Pi} = 0,07 \dots 0,18$  – для повноцінного,  $k_{\Pi} = 0,14 \dots 0,32$  – для некондиційного насіння та  $k_{\Pi} = 0,23 \dots 0,55$  для смітних домішок, діапазон кутів відриву відповідно становить  $\varphi_{\text{відр.}}^{(н.зерн.)} = 75^\circ \dots 111^\circ$ ,  $\varphi_{\text{відр.}}^{(ц.зерн.)} = 99^\circ \dots 145^\circ$ ,  $\varphi_{\text{відр.}}^{(дом.)} = 129^\circ \dots 162^\circ$ , що дає змогу чітко розмежовувати фракції, встановивши подільник у відповідних положеннях.



$\Phi(k_{\Pi})$  - інтегральний розподіл величини коефіцієнта парусності;  $P_i$  - накопичена частота появи величини коефіцієнта парусності

Рисунок 4 – Залежність кута відриву часток від коефіцієнтів парусності елементів зерноsumіші

Наприклад, при встановленні його на куті  $129^\circ$  можемо зробити висновок про повне виділення повноцінного зерна із початкового матеріалу, при цьому вміст некондиційного зерна в фракції повноцінного становитиме до 65%. При цьому буде

спостерігатись 100-відсоткове очищення зерна від легких домішок при втратах некондиційного зерна у відходах до 35%.

Висновок. Запропонована методика дозволяє теоретично визначити місце встановлення подільника зерна для забезпечення необхідної якості очищення. Так при очищенні зернового матеріалу від легких домішок з дотриманням вимог до вторинного очищення, кут поділу фракцій становить 135...140°.

## Список літератури

1. [www.ukrstat.gov.ua](http://www.ukrstat.gov.ua) – Державна служба статистики України. Виробництво основних сільськогосподарських культур у 2011 році.
2. 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.
3. Боуманс Г. Эффективная обработка и хранение зерна / Г. Боуманс ; [пер. с англ. В. И. Дашевского]. – М. : Агропромиздат, 1991. – 608 с.
4. 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.
5. Васильковський О. М. Математична модель роботи відцентрово-пневматичного сепаратора зерна / О. М. Васильковський, В. В. Гончаров, Д. І. Петренко, С. М. Лещенко // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету – Вип. 10. Т.8. – Мелітополь: ТДАТУ, 2010. – С. 94–104.

*А.М. Васильковський, В.В. Гончаров, Д.И. Петренко, С.Н. Лещенко*

### **Аналитическое исследование качества разделения зерносмеси центробежно-пневматическим сепаратором**

Отмечены проблемные вопросы подготовки зернового материала к хранению. Приведенные результаты математического моделирования процесса перемещения частицы по внешней прутковой поверхности вращательного барабана в пневматическом канале. Используя графоаналитический метод исследования определено теоретическое качество разделения зерносмеси на компоненты центробежно-пневматическим сепаратором.

*A. Vasil'kovskiy, V. Goncharov, D. Petrenko, S. Leschenko*

### **Analytical research quality division of grain mixture by the centrifugal-pneumatic separator**

The problem questions preparation of grain-growing material are marked to storage. The brought results over of mathematical design process of moving part on the external surface small twig of rotatory drum in a pneumatic channel. Using the graphoanalytical method of research theoretical quality division of grain mixture is certain on components by a centrifugal-pneumatic separator.

Одержано 02.10.11