

ПРОЦЕСИ ТА ОБЛАДНАННЯ ПЕРЕРОБНИХ ТА ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

УДК 631.362.3

ДО ПИТАННЯ ПНЕВМОГРАВІТАЦІЙНОЇ СЕПАРАЦІЇ ЗЕРНОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Котов Борис Іванович, д.т.н., професор
Спірін Анатолій Володимирович, к.т.н., доцент
Твердохліб Ігор Вікторович, к.т.н., старший викладач
Вінницький національний аграрний університет
Степаненко Сергій Петрович, к.т.н, ст. наук. співр.
Швидя Віктор Олександрович, к.т.н.

Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства»

Kotov B.

Spirin A.

Tverdokhlib I.

Vinnitsia National Agrarian University

Stepanenko S.

Shvyda V.

National Scientific Center «Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture»

Анотація: у статті розглянуті питання інтенсифікації процесу сепарації зернових матеріалів в пневмогравітаційному сепараторі, шляхом зміни швидкості повітряного потоку по висоті пневматичного каналу. Визначено критерій ефективності і його залежність від режимних параметрів.

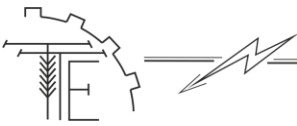
Ключові слова: сепарація, повітряний потік, критерій ефективності.

Постановка проблеми

Повітряна сепарація (очищення та розділення зернової маси) є одним із найбільш поширених способів післязбиральної обробки зернових сумішей різних культур. Для реалізації повітряної сепарації використовують пневмосепаратори, які мають просту конструкцію і компактність, та надійні в експлуатації. Існуючі конструкції пневмосепаруючих робочих органів розділяють зернові суміші за аеродинамічними властивостями частинок тільки на дві основні фракції: важку та легку. Тому їх використовують для очищення зерна від дрібних домішок, або для повторного розділення за розміром або за густиною: при введенні матеріалу у потік повітря частинки однакової густини розділяються за розміром або однакового розміру за густиною. При цьому існує стійкий зв'язок між критичною швидкістю і їх біологічними властивостями [1, 2]. Насіння, що має високу критичну швидкість – має кращі біологічні властивості. Тому доцільно використовувати повітряний потік для розділення насінневого матеріалу на декілька фракцій. Поява нових конструкцій пневмосепараторів [3, 4, 5] з нижньою зоною розділення і вивантаження окремих фракцій дозволяє використовувати спосіб розділення за траєкторіями [6, 7] і у пневмогравітаційних каналах зерноочисних машин, що є перспективним напрямком їх вдосконалення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Огляд існуючих технологій і технічних засобів для сепарації зернового матеріалу повітряним потоком та аналіз результатів їх досліджень [2, 5, 6, 7] дозволив виявити наступне. Вертикальні пневмосепаратори, які використовуються на зернопереробних підприємствах, як правило, сепарують матеріал як двофракційну суміш [2, 4, 6] за різницею опору повітряному середовищу різних фракцій зернового матеріалу. Для поділу зернової суміші на декілька фракцій у повітряному потоці використовують похилі пневмоканали [8] і принципи пневмоінерційної сепарації шляхом вкидання зернової маси у всмоктуючий чи нагнітаючий повітряний потік. Розділення відбувається у результаті різниці в опорі повітряю компонентів зернової суміші (маси), вкинутою з досить великою початковою швидкістю. Встановлено, що найбільш впливовими на технологічну ефективність сепарації [2, 5, 7] факторами є: аеродинамічні властивості матеріалу і питоме навантаження на пневмоканал; характеристики повітряного потоку і геометрія каналу; умови вводу зернової суміші у повітряний потік. Але як показує досвід експлуатації [6], визначальними характеристиками пневмосепаруючої системи є швидкість і кут подачі зернової маси у канал (потік повітря) і параметри розподільчого елемента.



Підвищення якості поділу зернових матеріалів у вертикальному пневмоканалі можна здійснити за рахунок вдосконалення способу подачі зерна у повітряний потік і оптимізації самого потоку. Найбільш ефективна [7] подача матеріалу тонким шаром. Реалізувати таку подачу можна використанням ротаційних та обертальних поверхонь (конус, сфера, параболоїд) у яких площа зовнішньої поверхні збільшується при віддаленні від вершини. У процесі руху по такій поверхні товщина шару зерна зменшується і в потік повітря можливо вводити окремі зерна.

У літературі наведені розбіжні дані щодо параметрів введення матеріалу у канал – кут, під яким вводиться матеріал у канал α_0 і швидкість v_0 : 0° - 10° , 0,2-0,5 м/с [6]; 0° , 0,7 м/с [9]; 0° - 10° , 0,2-0,8 м/с [7]; Оскільки, ці параметри, як свідчать експериментальні дані, суттєво впливають на процес розділення за критерієм відхилення траєкторій руху частинок матеріалу, як у верхній (відносно вводу), так і нижній зоні каналу, то є доцільним, на основі єдиного методичного підходу, виявити вплив початкових умов руху частинки і режиму сепарації на якість розділення.

Мета дослідження

Визначення ефективності поділу насінневого матеріалу за комплексом його параметрів у залежності від режимів роботи пневмогравітаційного сепаратора.

Основні результати досліджень

Сортування зернової суміші повітряним потоком, як відомо, ґрунтується на здатності окремих частинок чинити різну протидію повітряному середовищу при їх відносному русі у залежності від фізичних властивостей. У практиці повітряної сепарації такі властивості прийнято характеризувати комплексним показником – коефіцієнтом парусності (вітрильності), який має розмірність (m^{-1}) та визначається із виразів:

$$K = C_x(\text{Re}) \frac{\rho_0 \cdot S}{2 \cdot m} = \frac{q}{v_{\text{внт}}^2}, \quad (1)$$

де $C_x(\text{Re})$ – безрозмірний коефіцієнт опору є функцією критерія Рейнольдса;

ρ_0 – густина повітря;

m, S – маса і площа міделевого перерізу частинки;

$v_{\text{внт}}$ – швидкість витання даного класу частинок.

Найбільш точно, швидкість витання (або критична швидкість) визначається експериментально, тому величина коефіцієнта парусності K є реальною характеристикою частинок кожної фракції, на які поділяється зернова суміш.

При дослідженні процесу сепарації в основу наших розрахунків покладено наступні припущення: властивості частинки не залежно від її орієнтації в потоці характеризується коефіцієнтом парусності, який визначено за швидкістю витання; сила опору пропорційна квадрату швидкості; повітряний потік однорідний і рівномірно розділений за перерізом каналу.

В якості імітаційної моделі процесу сепарації використано загальноприйняті в даній галузі знань [6] диференціальні рівняння руху матеріальної частинки у середовищі з опором (Ньютоновським):

$$\frac{d^2 y(\tau)}{d\tau^2} = g - K \cdot \left(\frac{dy(\tau)}{d\tau} + v \right) \cdot \sqrt{\left(\frac{dy(\tau)}{d\tau} + v \right)^2 + \left(\frac{dx(\tau)}{d\tau} \right)^2}, \quad (2)$$

$$\frac{d^2 x(\tau)}{d\tau^2} = -K \cdot \frac{dx(\tau)}{d\tau} \cdot \sqrt{\left(\frac{dy(\tau)}{d\tau} + v \right)^2 + \left(\frac{dx(\tau)}{d\tau} \right)^2}, \quad (3)$$

При початкових умовах: $\tau=0$; $x=0$; $y=0$;

$$\frac{dx}{d\tau} = v_0 \cos \alpha_0; \quad \frac{dy}{d\tau} = v_0 \sin \alpha_0. \quad (4)$$

В рівняннях (2-4) мають місце позначення:

v – швидкість повітря в каналі, м/с;

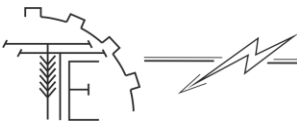
v_0 – швидкість частинки при вході у потік, м/с;

α_0 – кут швидкості частинки при вході у потік, град;

y, x – координати руху частинки, м;

τ – час, с;

g – прискорення сили тяжіння, м/с².



Канал вертикальний, повітря подається знизу (проти напрямку y).

Визначаємо поняття ефективності розділення і чіткості сепарації. При сепарації насіння зернових культур основним завданням процесу є виключення або мінімізація потрапляння «некондиційних фракцій» (легке, розломане, порожнє та ін.) у відібраний посівний матеріал. Тому за чіткість розділення можна прийняти процентне відношення кількості некондиційного продукту. У відібраному насінні:

$$\eta = \frac{m_H - m_{H.T.}}{m_H} \cdot 100, \quad (5)$$

де $m_H, m_{H.T.}$ – кількість відібраного насіння і кількість некондиційного зерна у відібраної фракції, кг.

За критерій розділення насінневої суміші можна прийняти величину відхилення траєкторії руху фракцій у місці їх вивантаження:

$$\Delta x = x_2 - x_1, \quad (6)$$

де x_2 – відхилення важкої фракції, м;

x_1 – відхилення легкої фракції, м;

Обмеженням може бути величина максимального відхилення частинок основної фракції $x_{2\max}$, яка не повинна перевищувати розмір «глибини каналу»; для кільцевого каналу це $(R - r)$, де R – радіус труби каналу, r – радіус розподільчого пристрою. Тому доцільно визначити величину критерію ефективності відношенням.

$$\varepsilon = \frac{\Delta x}{R - r} = \frac{x_2 - x_1}{x_{2\max}}. \quad (7)$$

Для визначення раціональних значень швидкості і кута подачі матеріалу у канал, а також повітря у канал на величину розходження траєкторій і критерію ефективності було проведено серію числових експериментів при таких змінних чинниках кут вводу матеріалу.

За даними результатів числового моделювання за планом трьох факторного експерименту отримані адекватні математичні моделі регресії процесу розділення двокомпонентної зернової суміші за масою і швидкістю витання ($m_1 = 0,04 \cdot 10^{-3}$ кг; $v_{\text{вн.1}} = 7,9$ м/с; $m_2 = 0,025 \cdot 10^{-3}$ кг; $v_{\text{вн.2}} = 6,2$ м/с):

$$\Delta x(\alpha_0, v_0, v) = -0,088 + 0,003 \cdot \alpha_0 + 0,024 \cdot v \cdot v_0 - 0,001 \cdot \alpha_0 \cdot v_0 + \\ + 0,002 \cdot v^2 - 3 \cdot 10^{-4} \cdot v \cdot \alpha_0 - 6,13 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha_0^2, \quad (8)$$

$$\varepsilon(\alpha_0, v_0, v) = -0,583 + 0,017 \cdot \alpha_0 + 0,158 \cdot v \cdot v_0 - 0,008 \cdot \alpha_0 \cdot v_0 + \\ + 0,017 \cdot v^2 - 0,002 \cdot v \cdot \alpha_0 - 4,4 \cdot 10^{-5} \cdot \alpha_0^2, \quad (9)$$

За даними математичних моделей регресії побудовано поверхні відгуку (рис. 1).

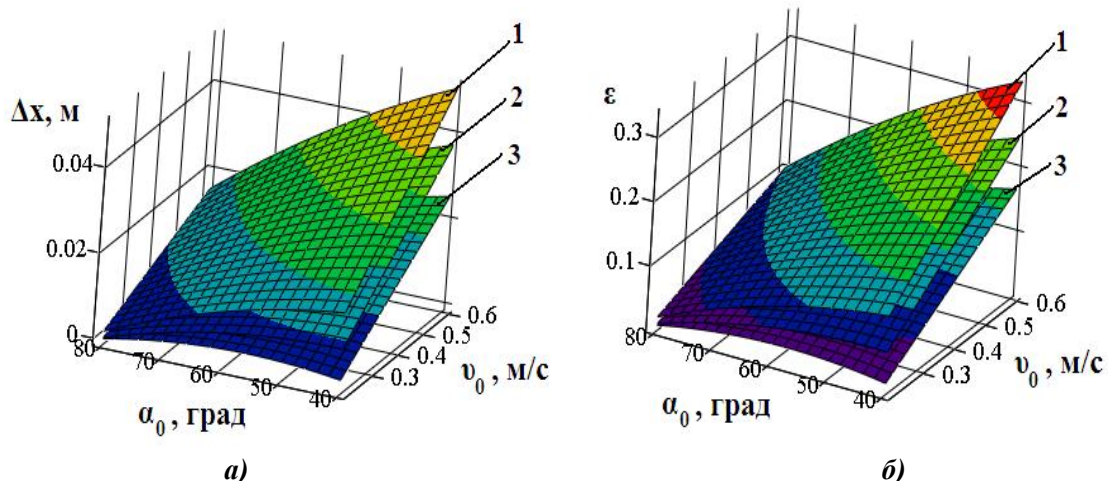
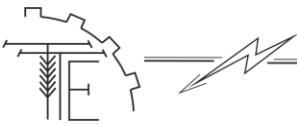


Рис. 1. Поверхні відгуку величини відхилення траєкторії руху фракцій у місці їх вивантаження Δx (а) та критерію ефективності ε (б)

При швидкості повітряного потоку: 1 – $v = 5,5$ м/с; 2 – $v = 5,0$ м/с; 3 – $v = 4,5$ м/с



Ефект збільшення розходження траєкторій на виході каналу підвищується при збільшенні швидкості подачі частинок в повітряний потік до значень 0,5-0,6 м/с при величині швидкості повітря наближеної до швидкості витання легкої фракції при куті 40° - 50° .

Швидкість повітря в каналі у вказаному діапазоні мало впливає на величину максимального відхилення траєкторії. Для каналу радіусом $R = 0,2$ м величина $\Delta x = 0,08$ м $x_2 = 0,2$ м та для каналу радіусом $R = 0,1$ м: $\Delta x = 0,05$ м $x_2 = 0,09$ м, відповідно критерії ефективності дорівнюють $\varepsilon_1=0,4$ і $\varepsilon_2=0,55$.

Аналіз проведених досліджень дозволив виявити основні недоліки і напрямки вдосконалення процесу пневмогравітаційного поділу зернових матеріалів. Реалізувати необхідні параметри подачі матеріалу у повітряний потік існуючими конічними розподільниками [3] не можливо. Тому для забезпечення швидкості сходу в широкому діапазоні її зміни (0,4-0,9 м/с) при кутах – 10 - 80° доцільно застосовувати розподільники у формі обертальних поверхонь в яких твірна, має форму кривої змінного радіуса. Оскільки швидкість руху частки вздовж опорної поверхні у зоні її сходу залежить від початкової швидкості, то останню можна використовувати як керуючий параметр.

Збільшення швидкості повітряного потоку (до величини близької виносу легкої частки) позитивно впливає на збільшення ефективності поділу за відхиленням траєкторій в межах 4,5-6 м/с майже не впливає на «теоретичну» величину відхилень. Але у реальному процесі сепарації потоку частинок різної парусності при збільшенні швидкості повітря на частинку починають діяти, сили, що виникають за рахунок несиметричного обтікання частки (неправильної форми) – сили [4] типу «сили Жуковського», відхиляючи частинку у випадковому напрямку, що зменшує ефективність поділу. Для уникання цього негативного явища доцільно збільшувати швидкість в зоні (вводу матеріалу в канал), а в нижній частині каналу швидкість повітря зменшувати. Для цього можна використовувати наприклад конічний кільцевий канал [5].

При зменшенні швидкості повітряного потоку в напрямку руху матеріалу за лінійним законом:

$$v_v = v_m - \alpha \cdot y(\tau), \quad (10)$$

де v_v – швидкість повітряного потоку, м/с;

v_m – швидкість повітряного потоку на початку руху частинки, м/с;

α – коефіцієнт зменшення швидкості.

Відхилення траєкторії у зоні інтенсивного розділення значно крутіше, а величина розщеплення траєкторій при цьому збільшується, підвищуючи ефективність сепарації.

На рис. 2 наведено траєкторії частинок зернового матеріалу при незмінній за висотою каналу швидкості повітряного потоку і при лінійному зменшенні швидкості вздовж потоку.

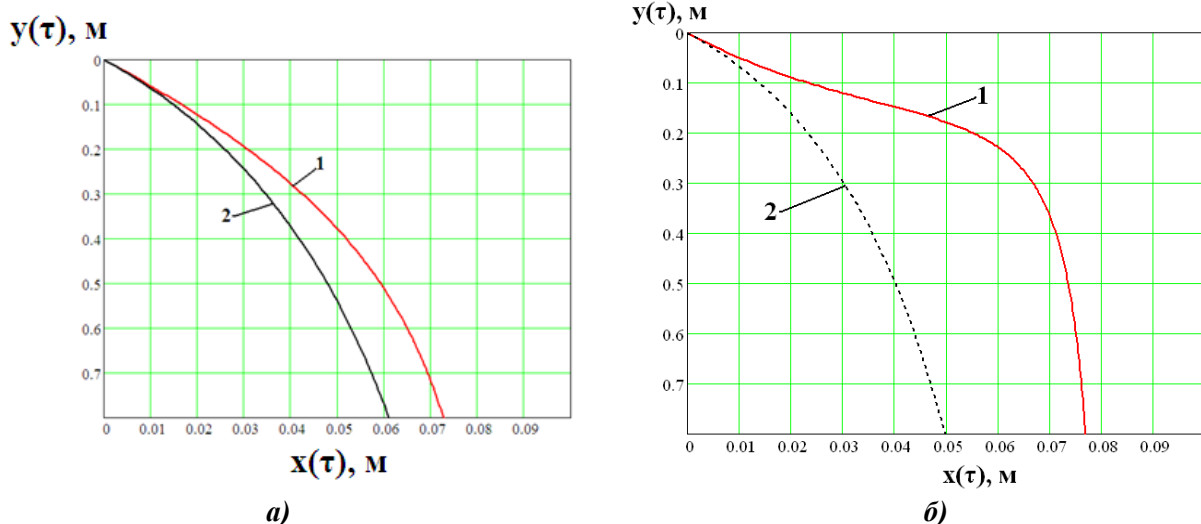
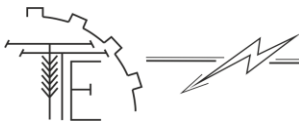


Рис. 2. Траєкторії руху фракцій при незмінній швидкості повітряного потоку (а) та лінійному зменшенні швидкості повітряного потоку по висоті (б): 1 – легка фракція $v_{\text{lim}} = 11,8$ м/с; 2 – важка фракція $v_{\text{lim}} = 12,1$ м/с



Висновки

Отримано залежність критерію ефективності пневмогравітаційного розділення зернових матеріалів та його залежності від параметрів процесу.

Визначено, що інтенсифікувати процес сепарації в пневмоканалі доцільно зменшенням швидкості потоку повітря в напрямку руху зернівок.

Список літератури

1. Мякин В.Н. Изучение возможности сортирования семян пшеницы в воздушном потоке / В.Н. Мякин, Б.П. Шалдаев, Ю.А. Крапивин // Сб. научных трудов Саратовского СХИ. –1975. –Вып.49. – С.126-129.
2. Сергеев А.С. Определение эффективности сепарирования семян по плотности в вертикальном воздушном потоке / А.С. Сергеев, И. Шушол // Сб. научных трудов МИИСП. –М., 1979. –Т.16. Вып.1. – С.72-76.
3. Кюрчев С.В. Аеродинамічний сепаратор для насіння / С.В. Кюрчев, В.М. Малкина, О.С. Колодій // Опис патенту №102657 на корисну модель. 2015. – Бюл. № 21.
4. Колодій А.С. Математическое описание поведения зерновок подсолнечника в воздушном потоке разделительных установок / А.С. Колодій, С.В. Кюрчев // Motrol. –Lublin-Rzeszow, 2015. – Vol.17. №9. –р.9-13.
5. Степаненко С.П. Дослідження процесу пневматичної сепарації насіння в кільцевому зигзагоподібному сепараторі / С.П. Степаненко // Вісник ХНТУСГ. – 2008. – Вип.75. т.1. – С.59-65.
6. Гортинский В.В. Вопросы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях / В.В. Гортинский, А.Б. Демский, М.А. Борискин. – М.: Колос, 1980. –303с.
7. Бурков А.И. Зерноочистительные машины / А.И. Бурков, Н.П. Сычугов. – Киров.: НИИСХСВ. – 2000. –261с.
8. Дідур В.А. Динаміка дисперсної фази запиленого повітряного потоку у вертикальному потоці пневмосепараторів рушанки рицини / В.А. Дідур, А.Б. Чебанов // Вісник ХНТУСГ. – 2012. – Вип.124. т.1. – С.52-63.
9. Бакум М.В. До обґрунтування ефективності використання пневматичного сепаратора з нахиленим повітряним каналом для попередньої сепарації насінневих сумішей петрушки / М.В. Бакум, М.М. Крехот, М.М. Абдуєв та інші. // Вісник ХНТУСГ. – 2010. – Вип. 103. – С. 267-274.
10. Шушол И. Исследование дополнительного сортирования посевного ячменя воздушным потоком / И. Шушол. Автореф. дис. канд. техн. наук. М. МИИСП. –1975. – 15 с.

References

1. Mjakin V.N. Izuchenie vozmozhnosti sortirovaniya semjan pshenicy v vozdushnom potoke / V.N. Mjakin, B.P. Shaldaev, Ju.A. Krapivin // Sb. nauchnyh trudov Saratovskogo SHI. –1975. –Vyp.49. – С.126-129.
2. Sergeev A.S. Opredelenie jeffektivnosti separirovaniya semjan po plotnosti v vertikal'nom vozdushnom potoke / A.S. Sergeev, I. Shushol // Sb. nauchnyh trudov MIISP. –М., 1979. –Т.16. Vyp.1. –С.72-76.
3. Kjurchev S.V. Aerodinamichnij separator dlja nasinnja / S.V. Kjurchev, V.M. Malkina, O.S. Kolodij // Opis patentu №102657 na korisnu model'. 2015. –Bjul. №21.
4. Kolodij A.S. Matematicheskoe opisanie povedeniya zernovok podsolnechnika v vozdushnom potoke razdelitel'nyh ustanovok / A.S. Kolodij, S.V. Kjurchev // Motrol. –Lublin-Rzeszow, 2015. – Vol.17. №9. –р.9-13.
5. Stepanenko S.P. Doslidzhennja procesu pnevmatichnoї separacїї nasinnja v kil'cevomu zigzagopodibnomu separatori / S.P. Stepanenko // Visnik HNTUSG. – 2008. – Vip.75. t.1. – S.59-65.
6. Gortinskij V.V. Voprosy separirovaniya na zernopererabatyvajushhijh predpriyatijah / V.V. Gortinskij, A.B. Demskij, M.A. Boriskin. – М.: Kolos, 1980. –303s.
7. Burkov A.I. Zernoochistitel'nye mashiny / A.I. Burkov, N.P. Sychugov. –Kirov.: NIISHSV. –2000. – 261 s.
8. Didur V.A. Dinamika dispersnoї fazi zapilenogo povitranogo potoku u vertikal'nomu potoci pnevmoseparatoriv rushanki ricini / V.A. Didur, A.B. Chebanov // Visnik HNTUSG. –2012. – Vip.124. t.1. –S.52-63.
9. Bakum M.V. Do obruntuvannja efektivnosti vikoristannja pnevmatichnogo separatora z nahilenim povitranim kanalom dlja poperedn'oi separacїї nasinnevih sumishej petrushki / M.V. Bakum, M.M. Krehot, M.M. Abduev ta insh. // Visnik HNTUSG. –2010. – Vip.103. –S.267-274.
10. Shushol I. Issledovanie dopolnitel'nogo sortirovaniya posevnogo jachmenja vozdushnym potokom / I. Shushol. Avtoref. dis. kand. tehn. nauk. M. MIISP. –1975. –15 s.

К ВОПРОСУ ПНЕВМОГРАВИТАЦИОННОЙ СЕПАРАЦИИ ЗЕРНОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация: в статье рассмотрены вопросы интенсификации процесса сепарации зерновых материалов в пневмогравитационном сепараторе, путем изменения скорости воздушного потока по высоте пневматического канала. Определен критерий эффективности и его зависимость от режимных параметров.

Ключевые слова: сепарация, воздушный поток, критерий эффективности.

TO A QUESTION PNEUMATIC GRAVITY SEPARATION GRAIN MATERIALS

Summary: the article deals with the intensification of the process of separation of grain materials in pneumatic-gravity separator, by changing the air flow rate adjustment pneumatic channel. It defines the criteria of efficiency and its dependence on the regime parameters.

Keywords: separation, air flow, the criterion of efficiency.