

УДК 631.362.3

Дослідження закономірностей руху компонентів зернового матеріалу під час пневмогравітаційного фракціонування у вертикальному каналі

Степаненко С. П., с.н.с., к.т.н., Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства», e-mail: stepanenko_s@ukr.net

Котов Б. І., проф., д.т.н., Подільський державний аграрно-технічний університет (ПДАТУ), м. Кам'янець-Подільський, Україна

Анотація

Мета. Дослідження принципів підвищення ефективності фракціонування зернового матеріалу повітряними потоками у вертикальному каналі.

Методи. Теоретичні дослідження ґрунтуються на основних положеннях теоретичної механіки, зокрема динаміки, а також теорії диференціальних рівнянь першого та другого порядку.

Результати. Наведений математичний опис руху частинок зернової суміші в камері повітряно-гравітаційного сепаратора під час дії вертикального потоку повітря. Отримано траєкторії руху частинок з різним розміром. З певними припущеннями отримані закономірності зміни швидкості

переміщення матеріальної частинки (точки) від координат.

Висновки. На основі теоретичних досліджень визначена можливість поділу частинок зернового матеріалу на фракції за аеродинамічними властивостями у вертикальних каналах. Отримані спрощені математичні моделі руху компонентів зернового матеріалу в повітряних сепараторах з вертикальним каналом, дають можливість визначити раціональні режими роботи існуючих технічних засобів.

Ключові слова: змінна швидкість повітря, траєкторія, стійкість сил, фракції, повітряний потік, вітровий фактор, процес фракціонування, суміш зерна, повітряний сепаратор.

UDC 631.362.3

Investigation of the regularities of the movement of grain material components during the pneumogravitational fractionation in a vertical channel

Stepanenko S., PhD. tech. sciences, National Scientific Center "Institute for Mechanization and Electrification of Agriculture"

Kotov B., prof., Doctor of Tech. Sciences, Podolsky State Agrarian and Technical University (PDATU), Kamenets-Podolsky, Ukraine

Annotation

Purpose. Investigation of the principles of increasing the efficiency of grain fractionation by air flow in a vertical channel.

Methods. Theoretical studies are based on the main provisions of theoretical mechanics, in particular, dynamics, as well as the theory of differential equations of the first and second order.

Results. A mathematical description of the motion of particles of a grain mixture in the chamber of an air-gravity separator is given under the influence

of a vertical air flow. Trajectories of motion of particles with different sizes are obtained. With certain assumptions, the regularities of the change in the velocity of movement of a material particle (point) from coordinates are obtained.

Conclusions. Theoretical studies have established the possibility of increasing the efficiency of separation of grain materials with aerodynamic characteristics.

Keywords: variable air velocity, trajectory, stability of forces, fractions, air flow, wind factor, fractionation process, grain mixture, air separator.

УДК 631.362.3

Исследования закономерностей движения компонентов зернового материала при пневмогравитационном фракционировании в вертикальном канале

Степаненко С. П., с.н.с., к.т.н., Национальный научный центр «Институт механизации и электрификации сельского хозяйства»

Котов Б. И., проф., д.т.н., Подольский государственный аграрно-технический университет (ПДАТУ), г. Каменец-Подольский, Украина

Аннотация

Цель. Исследование принципов повышения эффективности фракционирования зернового материала воздушным потоком в вертикальном канале.

Методы. Теоретические исследования основываются на основных положениях теоретической механики, в частности динамики, а также теории дифференциальных уравнений первого и второго порядка.

Результаты. Приведено математическое описание движения частиц зерновой смеси в камере воздушно-гравитационного сепаратора при воздействии вертикального потока воздуха. Получены траектории движения частиц с различным размером. С определенными допущениями получены закономерности изменения скорости перемещения материальной частицы (точки) от координат.

Выводы. Теоретическими исследованиями установлена возможность повышения эффективности разделения зерновых материалов с аэродинамическими характеристиками.

Ключевые слова: переменная скорость воздуха, траектория, устойчивость сил, фракции, воздушный поток, ветровой фактор, процесс фракционирования, смесь зерна, воздушный сепаратор.

Постановка проблемы. Для отримання високоякісного насіннєвого матеріалу та товарного зерна необхідна швидка післязбиральна обробка зернового вороху (матеріалу), що безперервно надходить з поля, для одночасного його поділу на фракції відповідно до цільового призначення: насіння, продовольче зерно, фураж. Застосування такої фракційної технології досить перспективне і дозволяє зменшити затрати енергії й праці на післязбиральну обробку зерна та розвантажити (зменшити навантаження) машини спеціального призначення (решітні стани, трієри, пневмостоли або центрифуги), відповідно підвищивши якість їх функціональних показників. Реалізація такої технології на

самому початку обробки зерна можлива з використанням універсальних (щодо типу оброблюваного матеріалу) повітряних сепараторів, що працюють за принципом поділу сходової (низхідної частини вертикального каналу) частини матеріалу, з пневматичною очисткою в процесі завантаження (подачі матеріалу в канал).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для забезпечення ефективної обробки зерна в умовах зернопродукуючих господарств найбільш перспективною вчені [1–5] вважають фракційну технологію, яка може бути реалізована повітряно-решітними [3] та пневматичними (пневмофракційними) [4] машинами. Фракціонування зернових матеріалів повітряним потоком на початковій стадії поділу (розділення) забезпечує попереднє формування зернових потоків, які з мінімальними енергетичними витратами дозволяють отримати зерно насіннєвих і продовольчих кондицій, а також фуражного залишку [4–6]. Процеси поділу зерна на фракції за аеродинамічними властивостями розглянуто в роботах [5–8]: у вертикальних каналах [6–8], у нахиленому каналі [9], горизонтальних повітряних каналах [10]. З аналізу конструкцій існуючих пневмосепаруючих систем [11, 12] випливає, що найбільш розповсюдженими та дослідженими є канали з вертикально-висхідним повітряним потоком. Поява нових конструкцій пневмосепараторів з нижньою зоною поділу [7, 13] та вивантаження декількох фракцій дозволяє використовувати спосіб розділення за траєкторіями [14] в існуючих типах пневмосепараторів для поділу зерна на фракції. У літературі наведені розбіжні дані щодо впливу параметрів введення зерна в повітряний потік на ефективність поділу. Розрахунок траєкторій проводиться для окремих частинок у

рівномірному повітряному потоці без урахування впливу потоку матеріалу. Тому є доцільним провести аналіз процесу руху компонентів зернового матеріалу в нижній частині пневмосепаруючого каналу, оскільки проведені дослідження стосуються поділу матеріалу на «легкі» та «важкі» фракції, а сам процес сепарації відбувається у верхній (щодо лінії завантаження) частині каналу.

Науковою основою досліджень є фундаментальні наукові праці А. Маліса, А. Демідова, А. Нелюбова, В. Гортинского, які узагальнені в роботі [15].

Результати досліджень. Процес розділення компонентів зернового матеріалу в повітряному потоці, як відомо, заснований на різниці аеродинамічних властивостей окремих компонентів. Під час подавання потоку 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 падає (рухається) проти потоку, тобто вихідний матеріал розділяється на дві фракції. Але частина компонентів у низхідному потоці зерна, частки якого теж різняться аеродинамічними властивостями, буде рухатися донизу з різними траєкторіями, тобто низхідний потік розкладається і траєкторії розщеплюються (розгалужуються). За величиною відхилення траєкторій здійснюється поділ на фракції. Надалі розглядається тільки низхідний рух компонентів зернового матеріалу у висхідному повітряному потоці (рис. 1).

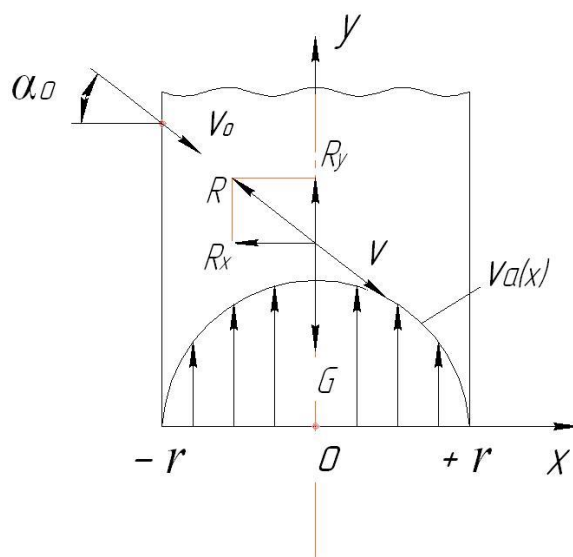


Рис. 1. Схема руху частки в повітряному каналі
 Fig. 1. Scheme of motion of a particle in the air channel

Основною аеродинамічною характеристикою компонентів зернового матеріалу є швидкість витання, величина якої в рівняннях руху визначається (враховується) коефіцієнтом вітрильності k_V :

$$k_V = \frac{C(Re)S_M\rho}{2m} = \frac{g}{V_B^2},$$

де $C(Re)$ – коефіцієнт аеродинамічного опору як функція числа Рейнольдса (Re);
 S_M – площа міделевого перерізу, m^2 ;
 ρ – густина повітря, m^3 ;
 m – маса частинки, kg ;

g – прискорення вільного падіння, m/s^2 ;
 V_B – швидкість витання, m/s .

Аеродинамічна сила опору R повітряному потоку пропорційна квадрату відносної швидкості U :

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

Під час дослідження процесу пневмофракціонування для спрощення порівняльного аналізу використані загальноприйняті припущення: обертання частки під дією несимет-

тричного обтікання не враховується; орієнтація частки – незмінна; величини k_V і S_M прийняті незмінними; швидкість витання частинок визначена експериментально; аеродинамічний режим у камері – усталений.

За імітаційну модель переміщення матеріальної частинки в рухомому середовищі з опором використані (загальноприйняті) типові диференціальні рівняння [15]:

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

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

з початковими умовами: $\tau = 0$; $x = -r$; $y = h$.

$$V_{0x} = \frac{dx(\tau)}{d\tau} = V_B \cos \alpha_0; \quad V_{0y} = V(x) + \frac{dy(\tau)}{d\tau} = V_B \sin \alpha_0, \quad (3)$$

$$V_B = \sqrt{V_{0x}^2 + \left(V(x) + V_{0y} \right)^2}.$$

Профіль поля швидкостей повітряного потоку (розділ швидкості) за глибиною 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:

$V(x)$ – швидкість потоку повітря на відстані x від стінок каналу, м/с;

V_0 – швидкість частинки при вході в потік повітря, м/с;

α_0 – кут вектору швидкості частинки при вході в потік повітря, град;

x, y – координати руху частки, м;

τ – поточний час, с;

V_D – динамічна швидкість, м/с;

a – експериментальний коефіцієнт (залежить від властивостей повітря й умов його руху в каналі);

V_M – швидкість повітря в каналі, м/с;

r – відстань від стінок до вісі каналу, м;

h – висота каналу (від місця вводу матеріалу), м.

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

$$\frac{d^2y(\tau)}{d\tau^2} = g - k_V \left(V_M + \frac{V_D}{a} \left[\ln \left(1 - \sqrt{\frac{|x|}{r}} \right) + \sqrt{\frac{|x|}{r}} \right] + \frac{dy(\tau)}{d\tau} \right) \sqrt{\left(V_M + \frac{V_D}{a} \left[\ln \left(1 - \sqrt{\frac{|x|}{r}} \right) + \sqrt{\frac{|x|}{r}} \right] + \frac{dy(\tau)}{d\tau} \right)^2 + \left(\frac{dx(\tau)}{d\tau} \right)^2}, \quad (5)$$

$$\frac{d^2x(\tau)}{d\tau^2} = -k_V \left(\frac{dx(\tau)}{d\tau} \right) \sqrt{\left(V_M + \frac{V_D}{a} \left[\ln \left(1 - \sqrt{\frac{|x|}{r}} \right) + \sqrt{\frac{|x|}{r}} \right] + \frac{dy(\tau)}{d\tau} \right)^2 + \left(\frac{dx(\tau)}{d\tau} \right)^2}. \quad (6)$$

Отже, за певних співвідношень визначальних факторів (швидкість повітряного потоку, кут і початкова швидкість введення матеріалу, щільність зернового потоку під час зустрічі з повітрям) вертикальний канал можна й доцільно використовувати для фракціонування зернових і насінневих

матеріалів [15] за технологічними властивостями (маса зерен, їх густина) [16, 17, 18, 19], які корелюють з аеродинамічними властивостями.

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

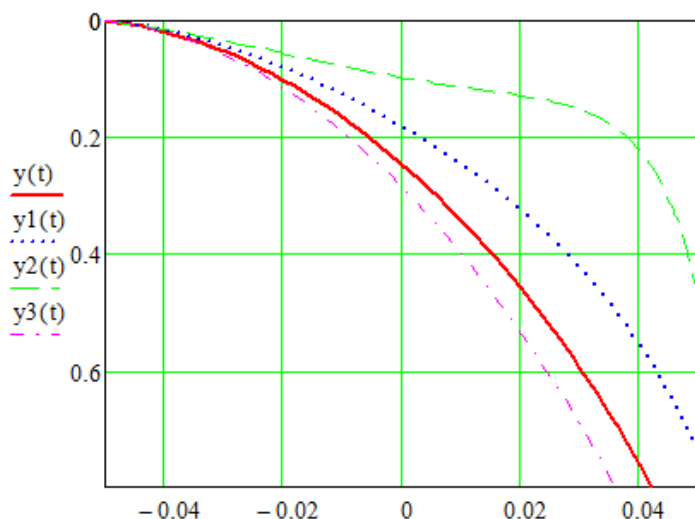


Рис. 2. Траєкторії руху частинок зернового матеріалу у вертикальному повітряному потоці: $\alpha_0 = 45^\circ$; $y(t) - V_B = 6$ м/с; $y1(t) - V_B = 8$ м/с; $y2(t) - V_B = 11$ м/с; $y3(t) - V_B = 5$ м/с

Fig. 2. Trajectories of grain particles movement in a vertical air stream: $\alpha_0 = 45^\circ$; $y(t) - V_B = 6$ m/s; $y1(t) - V_B = 8$ m/s; $y2(t) - V_B = 11$ m/s; $y3(t) - V_B = 5$ m/s

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

- швидкість повітряного потоку (за умови його рівномірності);
- початкова швидкість, кут і умови (щільність зернового потоку під час зустрічі із зерновим потоком) введення сепаруючої суміші в пневмоканал;

- фізико-механічні властивості компонентів зернової суміші.

Враховуючи, що в нижній зоні каналу (щодо місця введення матеріалу) траєкторії руху зернин з різними значеннями коефіцієнтів k_{Π} розходяться, це дає можливість поділу очищеного зернового потоку на фракції за аеродинамічними ознаками (рис. 2, 3).

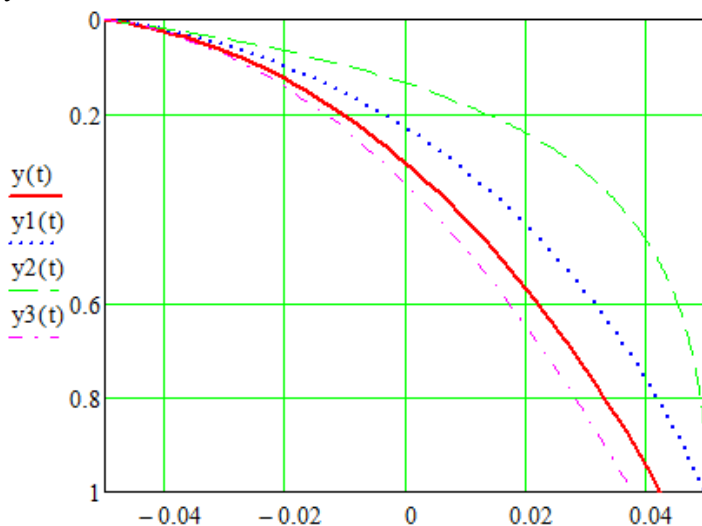


Рис. 3. Траєкторії руху частинок зернового матеріалу у вертикальному повітряному потоці: $\alpha_0 = 60^\circ$; $y(t) - V_B = 6$ м/с; $y1(t) - V_B = 8$ м/с; $y2(t) - V_B = 11$ м/с; $y3(t) - V_B = 5$ м/с

Fig. 3. Trajectories of grain particles movement in a vertical air stream: $\alpha_0 = 60^\circ$; $y(t) - V_B = 6$ m/s; $y1(t) - V_B = 8$ m/s; $y2(t) - V_B = 11$ m/s; $y3(t) - V_B = 5$ m/s

Із збільшенням швидкості повітряного потоку збільшуються винос «легких» частинок і величина розщеплення траєкторій «важких» частинок у нижній зоні каналу. Але зі збільшенням швидкості обтікання починають суттєво впливати сили «Жуковського» та «Магнуса» [15, 18], що призводить до довільного зміщення частинок від теоретичної траєкторії; водночас напрямок відхилення носить випадковий характер. Для

зменшення впливу вказаних сил доцільно зменшувати швидкість потоку повітря в напрямку руху зерна.

Висновки

На основі теоретичних досліджень визначена можливість поділу частинок зернового матеріалу на фракції за аеродинамічними властивостями у вертикальних каналах.

Отримані спрощені математичні моделі руху компонентів зернового матеріалу в повітряних сепараторах з вертикальним каналом, які дають можливість визначити раціональні режими роботи існуючих технічних засобів.

Бібліографія

1. Гиевский А. М. Повышение эффективности работы универсальных воздушно-решетных зерноочистительных машин: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.20.01. Воронеж, 2016. 40 с.
2. Оробинский В. И., Гиевский А. М. Теоретические предпосылки получения полноценного зерна фракционной технологией послеуборочной обработки. *Механизация и электрификация*. 2008. № 5. С. 8–10.
3. Производительность фракционных очистителей зерна и показатели их работы / А. П. Тарасенко [и др.]. *Тракторы и сельхозмашины*. 2009. № 9. С. 35–37.
4. Злочевский В. П., Терехова О. Н. Повышение технологической эффективности пневмофракционирования зерновых масс. *Хранение и переработка зерна*. 2004. № 5. С. 38–40.
5. Котов Б. І., Степаненко С. П., Калініченко Р. А. Концептуальні основи створення технічних засобів первинної обробки зерна в умовах господарств АПК. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний зб.* Кропивницький: ЦНТУ, 2017. Вип. 47. Ч. 1. С. 105–114.
6. Нестеренко О. В. Обґрунтування параметрів пневмосепаруючого каналу з багаторівневим введенням зернового матеріалу: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Кропивницький, 2017. 21 с.
7. Stepanenko S. P. Research pneumatic gravity separation grain materials (Исследование воздушно-гравитационной сепарации зерновых материалов). *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*. Bulgarian, 2017. Issue 2. S. 54–56.
8. Колодій О. С. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів пневмогравітаційного сепаратора насіння соняшника: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Мелітополь, 2015. 23 с.
9. Бакум М. В., Кречот М. М., Абдуев М. М. До обґрунтування ефективності використання пневматичного сепаратора з нахиленим повітряним каналом для попередньої сепарації насінневої суміші петрушки. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського*

господарства ім. П. М. Василенка. 2010. Вип. 103. С. 267–274.

10. Ермак В. П. Концепція аеродинамічної сепарації насіння сільськогосподарських культур та засоби її реалізації: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.05.11. Тернопіль, ТДАУ, 2009. 39 с.

11. Кошулько В. С. Тенденции развития технологии и технических средств для сепарации зерновых материалов. *Хранение и переработка зерна*. 2014. № 2. С. 22–24.

12. Степаненко С. П., Швидя В. О., Попадюк І. С. Аналіз розвитку конструкцій пневмосепаруючих систем сепараторів. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. Глеваха, 2017. Вип. 5 (104). С. 132–142.

13. Кюрчев С. В., Колодій О. С. Результаты исследования рациональных размеров вертикального аспирационного канала сепаратора семян с/х культур. *Motrol, Lublin*, 2013. Vol. 15. № 2. P. 169–175.

14. Колодій О. С., Кюрчев С. В. Математическое описание поведения зерновок подсолнечника в воздушном потоке разделительных установок. *Motrol, Lublin*, 2015. Vol. 17. № 9. P. 9–17.

15. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (сепарація, сушіння, активне вентилування, охолодження): монографія / Б. І. Котов, Р. А. Калініченко, С. П. Степаненко, В. О. Швидя, В. О. Лісецький. Ніжин: Видавець ПП Лисенко М. М., 2017. 552 с.

16. Підвищення ефективності попереднього очищення зернових сумішей / С. М. Лещенко, О. М. Васильковський, М. І. Васильковський, В. В. Гончаров. *Сільськогосподарські машини: збірник наукових праць Луцького національного університету*. Луцьк: ЛНТУ, 2009. Вип. 18. С. 230–234.

17. Васильковський М. І., Васильковський О. М., Лещенко С. М. Обґрунтування основних параметрів замкненої двохступеневої пневмосепаруючої системи ЗОМ. *Вісник Харківського національного технічного університету ім. П. Василенка*. Харків: ХНТУСГ, 2007. Вип. 59. С. 177–186.

18. Степаненко С. П., Котов Б. І., Спірін А. В. До питання математичного опису руху вимолоченого насіння в кільцевому каналі змінного перерізу. *Механізація сільськогосподарського виробництва: вісник ХНТУСГ ім. П. Василенка*. Харків: ХНТУСГ, 2017. Вип. 180. С. 330–339.

Bibliohrafiia

1. Giyevskiy A. M. Povysheniye effektivnosti raboty universal'nykh vozdushno-reshetnykh zernoochistitel'nykh mashin: avtoref. dis. ... dokt. tekhn. nauk: 05.20.01. Voronezh, 2016. 40 s.
2. Orobinskiy V. I., Giyevskiy A. M. Teoreticheskiye predposylki polucheniya polnotsennogo

zerna fraktsionnoy tekhnologiyey posleuborochnoy obrobki. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya*. 2008. № 5. S. 8–10.

3. Proizvoditel'nost' fraktsionnykh ochistiteley zerna i pokazateli ikh raboty / A. P. Tarasenko [i dr.]. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2009. № 9. S. 35–37.

4. Zlochevskiy V. P., Terekhova O. N. Povysheniye tekhnologicheskoy effektivnosti pnevmofraktsionirovaniya zernovykh mass. *Khraneniye i pererabotka zerna*. 2004. № 5. S. 38–40.

5. Kotov B. Í., Stepanenko S. P., Kalínichenko R. A. Kontseptual'ni osnovi stvorenniya tekhnichnikh zasobiv pervinnoi obrobki zerna v umovakh gospodarstv APK. *Konstruyuvannya, virobnytstvo ta yeksploatatsiya sil'skogospodars'kikh mashin: zagal'noderzhavniy mizhvidomchiy naukovotekhnichniy zb.* Kropivnits'kiy: TSNTU, 2017. Vip. 47. CH. 1. S. 105–114.

6. Nesterenko O. V. Obgruntuvannya parametriv pnevmoseparuyuchogo kanalu z bagatorivnevim vvedennyam zernovogo materialu: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.05.11. Kropivnits'kiy, 2017. 21 s.

7. Stepanenko S. P. Research pneumatic gravity separation grain materials (Issledovaniye vozdušnogravitatsionnoy separatsii zernovykh materialov). 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*. Bulgarian, 2017. Issue 2. S. 54–56.

8. Kolodiy O. S. Obgruntuvannya konstruktivno-tekhnologichnykh parametriv pnevmohravitatsiynoho separatora nasinnya sonyashnyka: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk: 05.05.11. Melitopol', 2015. 23 s.

9. Bakum M. V., Krekot M. M., Abduev M. M. Do obgruntuvannya efektyvnosti vykorystannya pnevmatichnoho separatora z nakhylenym povityranyym kanalom dlya poperedn'oyi separatsiyi nasinnyevoyi sumishi petrushky. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil'skoho hospodarstva im. P. M. Vasylenka*. 2010. Vyp. 103. S. 267–274.

10. Ermak V. P. Kontseptsiya aerodynamichnoyi separatsiyi nasinnya sil'skogospodars'kykh kul'tur ta zasoby yiyi realizatsiyi: avtoref. dys. ... dokt. tekhn. nauk: 05.05.11. Ternopil', TDAU, 2009. 39 s.

11. Koshul'ko V. S. Tendentsyy razvytyyya tekhnolohyy y tekhnicheskyykh sredstv dlya separatsiyi zernovykh materyalov. *Khraneniye y pererabotka zerna*. 2014. № 2. S. 22–24.

12. Stepanenko S. P., Shvydya V. O., Popadyuk I. S. Analiz rozvytku konstruktivnykh pnevmoseparuyuchykh system separatoriv. *Mekhanizatsiya ta elektrifikatsiya sil'skoho hospodarstva*. Hlevakha, 2017. Vyp. 5 (104). S. 132–142.

13. Kyurchev S. V., Kolodiy O. S. Rezul'taty yssledovannya ratsyonal'nykh razmerov vertykal'noho aspyratsyonnoho kanala separatora semyan s/kh

kul'tur. Motrol, Lublin, 2013. Vol. 15. № 2. P. 169–175.

14. Kolodiy O. S., Kyurchev S. V. Matematycheskoe opysanye povedeniyya zernovok podsolnechnyky v vozdushnom potoke razdelytel'nykh ustanovok. Motrol, Lublin, 2015. Vol. 17. № 9. P. 9–17.

15. Modelyuvannya tekhnologichnykh protsesiv v typovykh ob'yektakh pislyazbyral'noyi obrobky i zberihannya zerna (separatsiya, sushynnya, aktyvne ventilyuvannya, okholodzhennya): monohrafiya / B. I. Kotov, R. A. Kalinichenko, S. P. Stepanenko, V. O. Shvydya, V. O. Lisets'kyy. Nizhyn: Vydavets' PP Lysenko M. M., 2017. 552 s.

16. Pidvyshchennya efektyvnosti poperedn'oho ochyshchennya zernovykh sumishey / S. M. Leshchenko, O. M. Vasyl'kovs'kyy, M. I. Vasyl'kovs'kyy, V. V. Honcharov. *Sil'skogospodars'ki mashyny: zbirnyk naukovykh prats' Luts'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu*. Luts'k: LNTU, 2009. Vyp. 18. S. 230–234.

17. Vasyl'kovs'kyy M. I., Vasyl'kovs'kyy O. M., Leshchenko S. M. Obgruntuvannya osnovnykh parametriv zamknenoyi dvokhstupenevoyi pnevmoseparuyuchoyi systemy ZOM. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu im. P. Vasylenka*. Kharkiv: KHNTUSH, 2007. Vyp. 59. S. 177–186.

18. Stepanenko S. P., Kotov B. I., Spirin A. V. Do pytannya matematychnoho opysu rukhu vymolochenoho nasinnya v kil'tsevomu kanali zminnoho pererizu. *Mekhanizatsiya sil'skogospodars'koho vyrobnytstva: visnyk KHNTUSH im. P. Vasylenka*. Kharkiv: KHNTUSH, 2017. Vyp. 180. S. 330–339.

Bibliography

1. Gievsky A. M. Increase in the efficiency of universal air-grating grain cleaning machines: the author's abstract. dis. ... Doct. tech. sciences: 05.20.01. Voronezh, 2016. 40 p.

2. Orobinskii V. I., Gievsky A. M. Theoretical prerequisites for obtaining high-grade grain by fractional technology of post harvest harvesting. *Mechanization and electrification*. 2008. No. 5. P. 8–10.

3. Productivity of fractional grain cleaners and indicators of their work / A. P. Tarasenko [and others]. *Tractors and agricultural machinery*. 2009. No. 9. P. 35–37.

4. Zlochevsky V. P., Terekhova O. N. Increase of technological efficiency of pneumofraction of grain masses. *Storage and processing of grain*. 2004. No. 5. P. 38–40.

5. Kotov B. I., Stepanenko S. P., Kalinichenko R. A. Conceptual basis of technical maintenance of the initial grain box in the state of the agrarian and industrial complex. *Construction, vibrobntsvot eksploatatsiya sylskogospodarskikh machines: zagal'noderzhavniy mizhvidomchiy naukovotekhnichniy zb.* Kropivnits'kiy: TSNTU, 2017. Vip. 47. CH. 1. S. 105–114.

tehnicny zb. Kropivnitsky: TsNTU, 2017. Issue 47. Part 1. P. 105–114.

6. Nesterenko O. V. Obnortunuvannya parametri in the pneumoseparating channel from the bagatrivnevim entered the grain material: avtoref. dis. ... cand. tech. Sciences: 05.05.11. Kropivnitsky, 2017. 21 p.

7. Stepanenko S. P. Research pneumatic gravity Separation of grain materials (Study of airborne separation of grain materials). *International scientific jornal. Mechanization in agriculture. Scientific technical union of mechanical engineering industry-4.0 Bulgarian association of mechanization in agriculture.* Bulgarian, 2017. Issue 2. P. 54–56.

8. Kolodiy O. S. Justification of the structural and technological parameters of the pneumogravitational separator of sunflower seeds: author's abstract. dis ... Candidate tech. Sciences: 05.05.11. Melitopol, 2015. 23 p.

9. Bakum M. V., Krekot M. M., Abduev M. M. To substantiate the effectiveness of using a pneumatic separator with a tilted air channel for preliminary separation of seed mixture of parsley. *Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture named after. P. M. Vasilenko.* 2010. Issue 103. P. 267–274.

10. Ermak V. P. The concept of aerodynamic separation of seeds of agricultural crops and means of its implementation: author's abstract. dis ... doc. tech Sciences: 05.05.11. Ternopil, TDAU, 2009. 39 p.

11. Koshulko V. S. Trends in the development of technology and technical means for the separation of grain materials. *Storage and processing of grain.* 2014. No. 2. P. 22–24.

12. Stepanenko S. P., Shvydya V. O., Popadyuk I. S. Analysis of the development of

constructions of air separation systems of separators. *Mechanization and electrification of agriculture.* Glevaha, 2017. Issue 5 (104). P. 132–142.

13. Kürchev S. V., Kolodiy O. S. Results of study of rational dimensions of vertical aspiration channel of seed separator of agricultural crops. Motrol, Lublin, 2013. Issue 15. No. 2. P. 169–175.

14. Kolodiy O. S., Kirchev S. V. The mathematical description of the behavior of sunflower grains in the air flow of separating plants. Motrol, Lublin, 2015. Vol. 17. No. 9. P. 9–17.

15. Modeling of technological processes in typical objects of post-harvest processing and storage of grain (separation, drying, active ventilation, cooling): monograph / B. I. Kotov, R. A. Kalinichenko, S. P. Stepanenko, V. O. Shvydya, V. O. Lisetskii. Nizhyn: Publisher PE Lysenko M. M., 2017. 552 p.

16. Increasing the efficiency of pre-purification of cereal mixtures / S. M. Leshchenko, A. M. Vasilkovsky, M. I. Vasilkovsky, V. V. Goncharov. *Agricultural machines: collection of scientific works of Lutsk National Technical University.* Lutsk: LNTU, 2009. Issue 18. P. 230–234.

17. Vasilkovsky M. I., Vasilkovsky O. M., Leshchenko S. M. Substantiation of the main parameters of a closed two-stage pneumatic separating system ZOM. *Herald of Kharkiv National Technical University named after P. Vasilenko.* Kharkiv: KhNTUSG, 2007. Issue 59. P. 177–186.

18. Stepanenko S. P., Kotov B. I., Spirin A. V. On the issue of mathematical description of motion of shredded seed in a ring channel of variable section. *Mechanization of agricultural production: herald KhNTUSG named after P. Vasilenko.* Kharkiv: KhNTUSG, 2017. Issue 180. P. 330–339.