

УДК 631.362.3

Основні концептуальні положення пневматичного фракціонування зернових матеріалів

Степаненко С. П., к.т.н., с.н.с., Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства», ORCID iD 0000-0002-8331-4632

Котов Б. І., проф., д.т.н., Подільський державний аграрно-технічний університет (ПДАТУ), ORCID iD 0000-0001-6369-3025

Анотація

Мета. Встановлення основних принципів підвищення ефективності фракціонування зернового матеріалу повітряними потоками.

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

Результати. Отримано математичний опис руху частинок зернової суміші в камері гравітаційно-повітряного сепаратора під час дії горизонтального та вертикального потоків повітря змінної швидкості, а також траєкторії руху частинок із різним розміром. З певними припущеннями отримані закономірності зміни швидкості переміщення матеріальної частинки (точки) від координат.

Висновки

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

2. Використання горизонтального повітряного потоку як розділяючого носія дозволяє значно збільшити величину розщеплення траєкторій і критерій поділу зерна на фракції.

3. Створені спрощені математичні моделі руху компонентів зернового матеріалу в повітряних сепараторах із вертикальним і горизонтальним каналами, які дозволяють визначити раціональні режими роботи існуючих установ.

Ключові слова: сепаратор, повітряний потік, зернівка, змінна швидкість повітря, траєкторія, сила опору, фракції, вертикальний канал, коефіцієнт вітрильності.

UDC 631.362.3

The main conceptual provisions for the pneumatic fractionation of grain materials

Stepanenko S., PhD. tech. sciences, National Scientific Center "Institute of Agricultural Engineering and Electrification", ORCID iD 0000-0002-8331-4632

Kotov B., Prof., Doctor of Tech. Sciences, Podilsky State Agrarian Technical University (PDATU), Kamyanets-Podilskyi, Ukraine

Annotation

Purpose. Identification of the basic principles of increasing the efficiency of grain fractionation by air flows.

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 a gravitational-air separator chamber to the effect of a horizontal and vertical air flow of variable velocity

and trajectories of motion of particles with different sizes are obtained. With certain assumptions, the obtained regularities in the rate of movement of a material particle (point) from coordinates.

Conclusions

1. On the basis of theoretical studies, the possibility of separation of grain material particles into fractions by aerodynamic properties in vertical channels with lower unloading is determined.

2. The use of horizontal airflow as a separating medium can significantly increase the size of the split trajectories and the criterion of grain separation into fractions.

3. Simplified mathematical models of the motion of components of grain material in air separators with vertical and horizontal channels, which allow determining the rational modes of operation of existing facilities, are created.

Keywords: separator, airflow, grain, variable air speed, trajectory, resistance force, fractions, vertical channel, wind age coefficient.

УДК 631.362.3

Основные концептуальные положения пневматического фракционирования зерновых материалов

Степаненко С. П., к.т.н., с.н.с., Национальный научный центр «Институт механизации и электрификации сельского хозяйства», ORCID iD 0000-0002-8331-4632

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

Аннотация

Цель. Установление основных принципов повышения эффективности фракционирования зернового материала воздушными потоками.

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

Результаты. Получены математическое описание движения частиц зерновой смеси в камере гравитационно-воздушного сепаратора при воздействии горизонтального и вертикального потоков воздуха переменной скорости, а также траектории движения частиц с различным размером. С определенными допущениями получены закономерности изменения скорости перемещения материальной частицы (точки) от координат.

Выводы

1. На основе теоретических исследований определена возможность разделения частиц зернового материала на фракции по аэродинамическим свойствам в вертикальных каналах с нижней выгрузкой.

2. Использование горизонтального воздушного потока как разделяющего носителя позволяет значительно увеличить величину расщепления траекторий и критерия разделения зерна на фракции.

3. Созданные упрощенные математические модели движения компонентов зернового материала в воздушных сепараторах с вертикальным и горизонтальным каналами, которые позволяют определить рациональные режимы работы существующих установок.

Ключевые слова: сепаратор, воздушный поток, зерновка, переменная скорость воздуха, траектория, сила сопротивления, фракции, вертикальный канал, коэффициент парусности.

Постановка проблемы. У ринкових умовах виробництва зерна особливого значення набувають процеси механізації після-збиральної обробки зерна. Зерноматеріали після комбайнового збирання мають значну кількість домішок різного кількісного й якісного складу. Саме зерно являє собою поліфракційну за розміром, вологістю і біологічним складом масу. Крім того, в процесі тимчасового і тривалого зберігання частина зерна псується, пошкоджується шкідниками та змінює свої не тільки біологічні, але й фізико-механічні властивості. Тому задача ефективного відокремлення домішок, пошкодженого і неповноцінного зерна складає сутність проблеми підвищення технічної і технологічної ефективності зерноочисних машин.

Повітряна (пневматична) сепарація є одним із найпоширеніших способів очищення (розділення) зернових сумішей різних культур, а пневмосепаратори набагато дешевші, прості й надійні в експлуатації, ніж решітні машини. Тому подальший розвиток конструкцій цього класу машин і вдосконалення технології сепарування повітряним потоком є актуальною і своєчасною науково-технічною проблемою.

Незважаючи на значну кількість наукових праць і винаходів у цьому напрямку, можливості подальшого вдосконалення пневмосепаруючих машин для зерноматеріалів повністю не вичерпані.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У технічній літературі [1–3] і публікаціях [4–6] останніх років наведено достатньо даних щодо опису принципів роботи та

конструкцій машин для сепарації зернових матеріалів повітряними потоками, а також впливу діючих факторів на їх ефективність [7, 8] і методів розрахунків повітряних сепараторів [1, 9, 18]. У роботах розглянуто процеси поділу насіння за аеродинамічними властивостями у вертикальному каналі з нижнім вивантаженням [10] і горизонтальному каналі [4] та в зигзагоподібному каналі кільцевого перетину [11].

Слід відмітити наступні способи підвищення ефективності роботи пневмосепараторів різного типу [4, 9, 11, 14, 15, 18]. З розглянутих робіт механічне вкидання насіння у вертикальний потік повітря висвітлено в роботі [1], попереднє розшарування в гравітаційному русі зернин – [12], подача зерна псевдозрідженим шаром – [13], подача багаторівневою поверхнею живильного пристрою – [14].

На основі аналізу існуючих способів і технічних засобів первинної сепарації зернових матеріалів (очищення, розділення за розміром і вагою) зроблено висновок про можливість підвищення ефективності процесу сепарації на основі фракціонування зерна повітряними потоками, тобто попередній поділ зернової маси за розміром і вагою та подальший обробіток окремих фракцій за технологічним призначенням [16, 17, 18].

Комплексний підхід до задач підвищення технологічної ефективності повітряного фракціонування в існуючих дослідженнях відсутній.

Мета досліджень. Встановлення основних принципів підвищення ефективності фракціонування зернового матеріалу повітряними потоками.

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

Результати досліджень. Технологія сепарування зернової маси повинна визначатися її фракційним складом і призначенням кінцевих очищених (розділених) фракцій (фуражна, продовольча, насіннева). Виділення окремих фракцій здійснюють окремі машини, які функціонують за різними схемами: виділення фуражної фракції здійснюють решітними і трієрними схемами; поділ зерна на дрібну і крупну фракції (в елеваторній промисловості) – в повітряних сепараторах-фракціонерах А1-БСФ-О і

А1-БСШ з одночасним очищенням від сміттєвих і дрібних домішок.

Фракціонування зернової маси повітряними потоками є актуальним і перспективним напрямом розвитку технологій і машинних засобів первинної післязбиральної обробки зерна. Водночас використання повітряних потоків на початкових стадіях поділу забезпечує попереднє формування зернових потоків, які з мінімальними втратами і енерговитратами забезпечують отримання зерна продовольчих, насінневих і фуражних кондицій. Висока кореляція показника швидкості витання та технологічних властивостей компонентів зернових мас [7] дозволяє використовувати повітряну сепарацію на різних стадіях післязбиральної обробки зерна.

Залежно від співвідношення таких параметрів, як кут і швидкість вводу матеріалу в повітряний потік, швидкість і напрямок його руху відносно координати місця зустрічі частинки з потоком повітря, пневматичне сепарування може виконувати чотири функції або технологічні процеси:

- пневмосепарація (за загальним принципом) – поділ зернової маси на легкі та важкі (дрібні та крупні) частинки;
- пневмогравітаційне фракціонування – поділ на фракції за фізико-механічними властивостями (маса, густина, розмір), які корелюють зі швидкістю витання часток;
- пневмоінерційне фракціонування – вкидання зернового потоку в рухоме або нерухоме повітряні середовища (поділ зернової маси за аеродинамічними властивостями: сила опору повітряному середовищу збільшується);
- аеродинамічна (аеромеханічна) класифікація – подача струменевим зерноповітряним потоком (затоплений струмінь у камері).

Більш детальні класифікації схем пневмосепаруючих систем наведено в спеціальній літературі [8]. У наведеній умовній класифікації кожний клас (функціональне призначення) кореспондується з двома функціями сепарування: очищення (доочищення) і поділ на фракції за заданими властивостями (розмір, маса, густина).

Повітряне сепарування зернової суміші ґрунтоване на різниці опору окремих часток повітряного потоку. Можливість розділення частинок зернової суміші і сторонніх домішок найбільш доцільно визначати за швидкістю витання v_B :

$$v_B = \sqrt{\frac{2G}{\varepsilon \rho_v S}}, \quad (1)$$

де G – сила тяжіння частки, Н; ε – коефіцієнт опору (функція числа Рейнольдса); ρ_v – густина повітря, кг/м³; S – площа міделевого перетину, м².

Зазвичай швидкість витання (зважаючи швидкість) визначається експериментально і є основною характеристикою, що характеризує можливість розділення зерна та домішок.

Під час дослідження руху частинок зернового матеріалу, які розрізняються величиною швидкості витання, прийняті спрощуючі припущення:

- сила опору повітряному середовищу пропорційна квадрату швидкості;
- повітряний потік однорідний і рівномірно розділений за перерізом каналу (нормальним до напрямку повітряного потоку);
- властивості частинки (аеродинамічні) від орієнтації в потоці не залежать;
- обертання частинки відсутнє;
- аеродинамічні характеристики окремих часток, за якими визначається поділ, характеризуються коефіцієнтом вітрильності, який визначається формулою [8]:

$$k_{\Pi} = C_0(Re) \frac{\rho_v S}{2m} = \frac{g}{\vartheta_0^2}. \quad (2)$$

де k_{Π} – коефіцієнт вітрильності, м⁻¹;

g – прискорення вільного падіння, м/с²; $C_0(Re)$ – коефіцієнт опору (функція числа Рейнольдса).

Для моделювання процесу переміщення (руху) частинки в повітряному потоці робочого каналу використані типові рівняння руху матеріальної точки в рухомому повітряному середовищі, як в загальному випадку (політ частинки за наявності висхідного та зустрічного потоків повітря [14]).

$$\begin{cases} \ddot{x} + k_{\Pi}(\dot{x} + \vartheta_x) \sqrt{(\dot{x} + \vartheta_x)^2 + (\dot{y} + \vartheta_y)^2} = 0 \\ \ddot{y} + k_{\Pi}(\dot{y} + \vartheta_y) \sqrt{(\dot{x} + \vartheta_x)^2 + (\dot{y} + \vartheta_y)^2} = g \end{cases}. \quad (3)$$

де ϑ_x, ϑ_y – швидкість повітря в каналах (горизонтальному або вертикальному), м/с;

x, y – координати руху частки, м;

g – прискорення сили тяжіння, м/с²;

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt}, \dot{y} = \frac{dy}{dt}, \ddot{y} = \frac{d^2y}{dt^2}, \ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2}.$$

За початкових умов $\vartheta_x = 0; t = 0;$

$$x = 0; y = 0; \frac{dy}{dt} = \vartheta_0 \sin \alpha_0; \frac{dx}{dt} = \vartheta_0 \cos \alpha_0$$

(ϑ_0, α_0 – швидкість частки на вході в потік та кут її напрямку).

Рівняння системи (3) описують рух частинки у вертикальному каналі під час висхідного потоку повітря. Вектор швидкості повітряного потоку V_0 приймаємо сталим і спрямованим уздовж стінок каналу. Траєкторію руху часток будемо розглядати в прямокутній системі координат XOY (рис. 1).

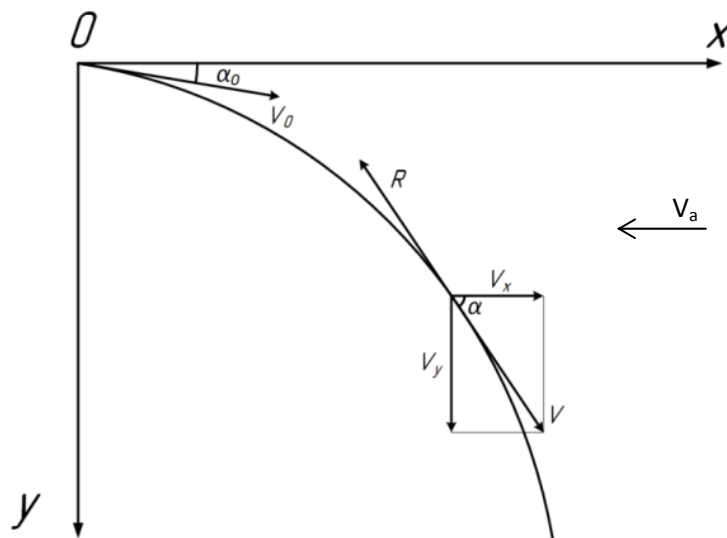


Рис. 1 Розрахункова схема сепарації
Fig. 1. Scheme of separation

Аналіз траєкторій руху частинок, побудованих за даними розв'язку системи рівнянь (3) в прикладних програмах, та аналогічних даних роботи [8] показав, що повного поділу «легких» і «важких» частинок зернової суміші в каналі не досягається в зв'язку з перекриваючими значеннями ознак поділу зернин і частинок домішок; за раціональних значень швидкості повітряного потоку частина дрібних, але важких домішок потрапляє в нижню зону каналу, тобто в очищене зерно. Водночас в нижній зоні каналу траєкторії руху часинок із різними значеннями коефіцієнта k_{Π} суттєво розходяться, що

зумовлює реальну можливість поділу очищеного зернового потоку на фракції за аеродинамічними властивостями.

Отже, за певних співвідношень визначальних факторів (швидкість повітряного потоку, кут і початкова швидкість введення матеріалу, щільність зернового потоку під час зустрічі з повітрям) вертикальний пневмоканал можна використовувати для фракціонування зернових [7] і насінневих матеріалів за технологічними властивостями (маса зерен, їх густина) [9, 10, 11], які корелюють з аеродинамічними властивостями.

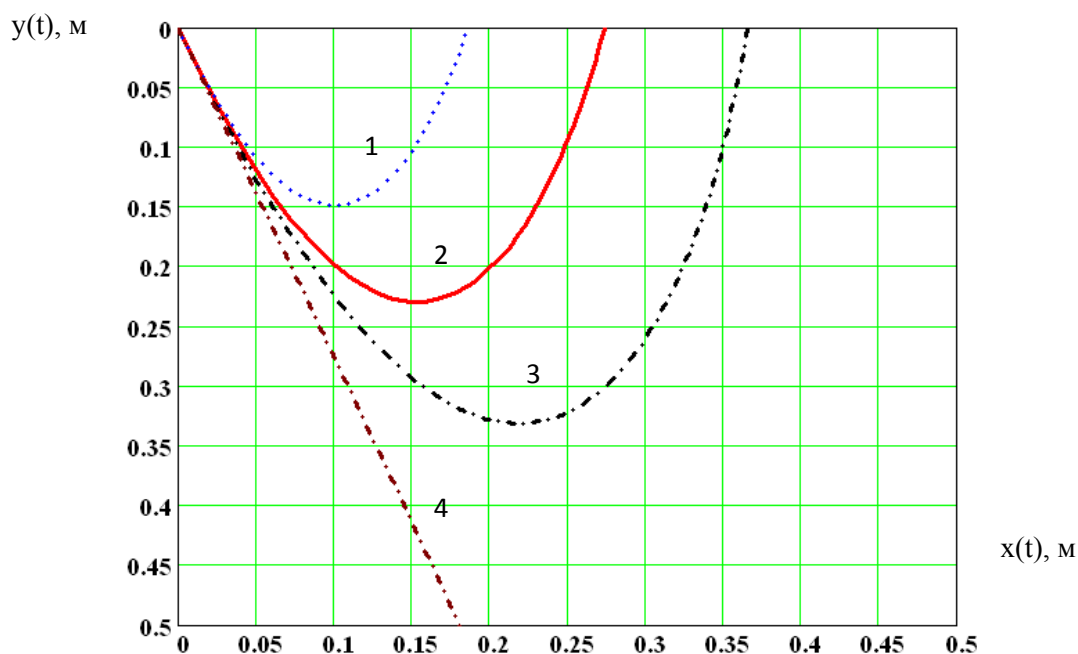


Рис. 2. Траєкторії руху частинок зернового матеріалу у вертикальному повітряному потоці:
 1 – $k_{\Pi} = 0,324$; 2 – $k_{\Pi} = 0,263$; 3 – $k_{\Pi} = 0,23$; 4 – $k_{\Pi} = 0,174$

Fig. 2. Movement of particles of grain material in a vertical air flow:
 1 – $k_{\Pi} = 0,324$; 2 – $k_{\Pi} = 0,263$; 3 – $k_{\Pi} = 0,23$; 4 – $k_{\Pi} = 0,174$

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

Найбільший вплив на ефективність поділу (розщеплення траєкторій) показують такі фактори:

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

- фізико-механічні властивості компонентів зернової суміші.

Враховуючи, що в нижній зоні каналу (відносно місця введення матеріалу) траєкторії руху зернин із різними значеннями коефіцієнта k_{Π} суттєво розщеплюються (розгалужуються) і розходяться, це дає можливість поділу очищеного зернового потоку на фракції за аеродинамічними ознаками (рис. 3).

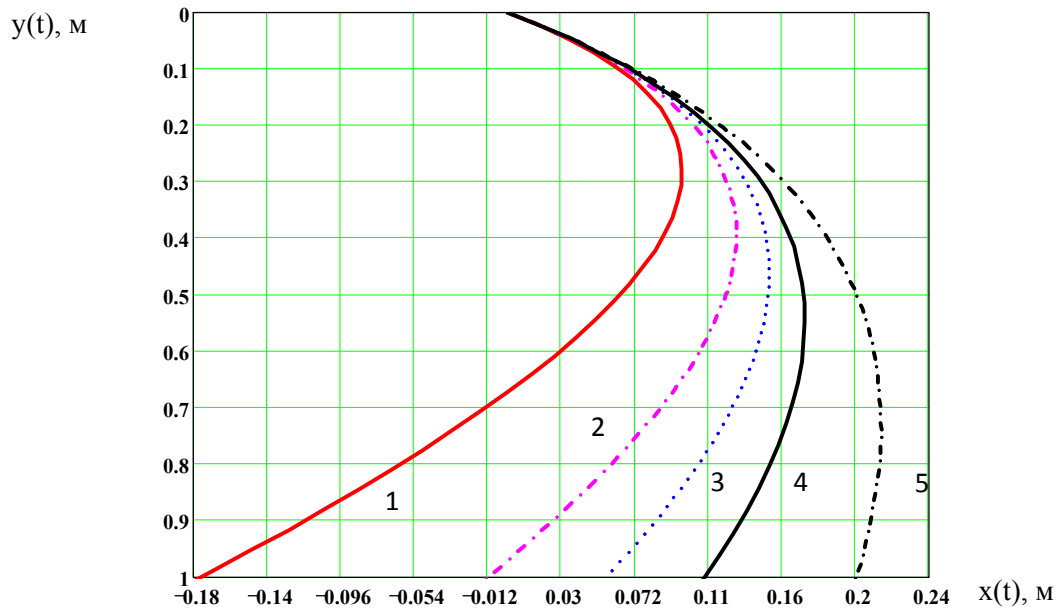


Рис. 3. Траєкторії руху зернин із різними значеннями коефіцієнта k_{π} у горизонтальному потоці:

1 – $k_{\pi} = 0,263$; 2 – $k_{\pi} = 0,2$; 3 – $k_{\pi} = 0,174$; 4 – $k_{\pi} = 0,153$; 5 – $k_{\pi} = 0,121$

Fig. 3. Trajectories of the grain movement with different values of the coefficient k_{π} in the horizontal flow:

1 – $k_{\pi} = 0,263$; 2 – $k_{\pi} = 0,2$; 3 – $k_{\pi} = 0,174$; 4 – $k_{\pi} = 0,153$; 5 – $k_{\pi} = 0,121$

Зі збільшенням швидкості повітряного потоку збільшується винос «легких» частинок і величина розщеплення траєкторій «важких» частинок у нижній зоні каналу. Але зі збільшенням швидкості обтікання починають суттєво впливати сили «Жуковського» і «Магнуса» [11, 16], що приводить до довільного зміщення частинок від теоретичної траєкторії; за цих обставин напрямок відхилення носить випадковий характер. Для зменшення впливу вказаних сил доцільно зменшувати швидкість потоку повітря в напрямку руху зерна.

Пневмоінерційне фракціонування зернових сумішей має особливості, які на користь використання цього способу:

- підсилена дія аеродинамічних ознак;
- у пневмоінерційному сепараторі можна отримувати значну кількість фракцій з можливістю регулювання їх якості;
- горизонтальний повітряно-зерновий потік менш енергозалежний від вертикального.

В основі способу покладено примусову швидкісну подачу зернового матеріалу під певним кутом у повітряний потік, швидкість якого перевищує швидкість витання зернівок усіх розмірів, що знаходяться в суміші, а напрямок повітря протилежний напрямку подачі зернового матеріалу або нормальний до напрямку введення матеріалу (рис. 1).

За початкових умов: $t = 0$; $x = y = 0$;

$$\dot{x}(0) = x_{0x} = v_0 \cos \alpha;$$

$\dot{y}(0) = y_0 = v_0 \sin \alpha$ (при $V_y = 0$) переміщення поодиноких частинок, що різняться величиною k_{π} коефіцієнта парусності, визначається розв'язком системи рівнянь (3).

Для порівняння ефективності розділення частинок зернового матеріалу на фракції за аеродинамічними властивостями визначимо критерій чіткості поділу, як величину відхилення траєкторій руху частинок у місці їх вивантаження, а саме:

$$\Delta x = x_2 - x_1, \quad (4)$$

де x_1, x_2 – відхилення траєкторії «легкої» і «важкої» фракції, відповідно, м.

Водночас обмеженням можна визначити величину максимального відхилення частинок основної (вертикальний потік), або легкої (горизонтальний потік) фракції, так як вони визначають глибину каналу.

Аналіз отриманих результатів показує, що використання горизонтального повітряного потоку з протитечійною подачею матеріалу дозволяє суттєво збільшити величину розщеплення траєкторій руху частинок і відповідно ефективність фракціонування зернового матеріалу.

Отже, визначена реальна можливість фракціонування зернових матеріалів за аеродинамічними властивостями з одночасним очищенням від легких сміттєвих домішок.

Для спрощення розрахунків траєкторій руху частинок зернового матеріалу за методикою [9, 10, 14, 17] отримано аналітичні залежності:

- вертикальний повітряний потік повітря (пневмогравітаційний процес поділу)

$$\vartheta_x = \vartheta_{0x} e^{-kt} \quad x = \frac{\vartheta_{0x}}{k} (1 - e^{-kt}); \quad (5)$$

$$\vartheta_y = \frac{c}{k} - \left(\frac{c}{k} - \vartheta_{0y}\right) e^{-kt} \quad y = \frac{c}{k} t - \frac{1}{k} \left(\frac{c}{k} - \vartheta_{0y}\right) (1 - e^{-kt}), \quad (6)$$

де $k = 1,11k_{\Pi}\vartheta_B$; $c = g - k\vartheta_B$; $\vartheta_{0x}, \vartheta_{0y}$ – швидкість повітря в каналах за заданих початкових умов, м/с;

- горизонтальний потік (пневмоінерційний процес поділу)

$$\vartheta_x = \vartheta - (\vartheta - \vartheta_{0x}) e^{-\frac{t}{k_0}} \quad x = \vartheta t - k_0(\vartheta - \vartheta_{0x})(1 - e^{-\frac{t}{k_0}}); \quad (7)$$

$$\vartheta_y = g_0 - (g_0 - \vartheta_{0y}) e^{-\frac{t}{k_0}} \quad y = g_0 t - k_0(g_0 - \vartheta_{0y})(1 - e^{-\frac{t}{k_0}}), \quad (8)$$

де $k_0 = \frac{1}{k\varphi\vartheta}$; $g_0 = \frac{g}{k\varphi\vartheta}$; $\varphi = \sqrt{\left(\frac{\dot{y}}{\vartheta}\right)^2 + \left(1 + \frac{\dot{x}}{\vartheta}\right)^2} \approx (1,02 - 1,12)$.

Встановлено, що для кожного поточно-го моменту часу $t = t_1$ з координатами переміщення частинки $y_i(t_i)$ та $x_i(t_i)$ у відповідних напрямках можливо побудувати траєкторії переміщення в системі координат ХОУ.

Висновки

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

2. Використання горизонтального повітряного потоку як розділюючого носія дозволяє значно збільшити величину розщеплення траєкторій і критерій поділу зерна на фракції.

3. Створені спрощені математичні моделі руху компонентів зернового матеріалу в повітряних сепараторах із вертикальним і горизонтальним каналами, які дозволяють визначити раціональні режими роботи існуючих технічних засобів.

Бібліографія

1. Бурков А. М., Сычугов М. П. Зерноочистительные машины. Конструирование, исследование, расчет и испытание. Киров: Из-во НИИСХ Северо-Востока, 2000. 258 с.
2. Дринча В. М. Исследование сепарации семян и разработка машинных технологий их подготовки. Воронеж: Издательство НПО «МОДЭК», 2006. 384 с.

3. Барский М. Д. Фракционирование порошков. М.: Недра, 1980. 327 с.

4. Ермак В. П. Концепція аеродинамічної сепарації насіння сільськогосподарських культур та засоби її реалізації: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Тернопіль: ТДАУ, 2009. 39 с.

5. Кошулько В. С. Тенденции развития технологических и технических средств для сепарации зерновых материалов. *Хранение и переработка зерна*. 2014. № 2 (179). С. 22–24.

6. Степаненко С. П., Швидя В. О., Попадюк І. С. Аналіз розвитку конструкцій пневмосепаруючих систем сепараторів. *Механізація та електрифікація сільського господарства: загальнодержавний зб.* / ННЦ «ІМЕСГ». Глеваха, 2017. Вип. № 5 (104). С. 132–142.

7. Злочевский В. Л., Терехова О. Н. Повышение технологической эффективности пневмофракционирования зерновых масс. *Хранение и переработка зерна*. 2004. № 5 (59). С. 38–40.

8. Гортинский В. В., Демский А. Б., Борискин М. А. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях. М.: Колос, 1980. 304 с.

9. Васильковський М. І., Гончарова С. Я., Лещенко С. М. Обґрунтування параметрів сепарації зерна в похилому повітряному потоці. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний зб.* Кіровоград: КНТУ, 2007. Вип. 37. С. 132–137.

10. Колодій О. С. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів пневмогравітаційного сепаратора насіння соняшника: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Мелітополь: ТДАУ, 2015. 23 с.

11. Степаненко С. П. Дослідження процесу пневматичної сепарації насіння в кільцевому зигзагоподібному сепараторі. *Механізація сільськогосподарського виробництва: вісник Харківського національного технічного університету сільськогосподарства ім. П. Василенка*. Харків: ХНТУСГ, 2008. Вип. 75. Т. 1. С. 59–65.

12. Туров А. К. Пневмосепарация зерна в вертикальном канале с подготовкой в струйном плоскопараллельном потоке: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск: СИБИМЭСХ, 1984. 19 с.

13. Сабашкин В. А. Разделение мелко-соломистого вороха с предварительной подготовкой в струйном воздушном потоке: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск: СИБИМЭСХ, 1988. 18 с.

14. Нестеренко О. В. Обґрунтування параметрів пневмосепаруючого каналу з багаторівневим введенням зернового матеріалу: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Кропивницький: ЦНТУ, 2017. 21 с.

15. Балістика крапель, які випаровуються при польоті / С. І. Кучеренко, В. П. Ольшанський, С. В. Ольшанський, Тіщенко Л. М. Харків: ХНТУСГ, 2007. 203 с.

16. 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 Харківського національного технічного університету сільськогосподарства ім. П. Василенка*. Харків: ХНТУСГ, 2017. Вип. 180 С. 330–339.

17. Stepanenko S. P. Research pneumatic gravity separation grain materials (Исследование воздушногогравитационной сепарации зерновых материалов). *Mechanization in Agriculture, conserving of the resources: International Scientific Journals of Scientific Technical Union of Mechanical Engineering "Industry 4.0"*. Bulgarian, 2017. Vol. 63. Issue 2. S.–54–56.

18. 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.

Bibliografia

1. Burkov A. M., Syichugov M. P. Zerno-ochistitelnyie mashinyi. Konstruirovaniye, issledovaniye, raschet i ispytaniye. Kirov: Iz-vo NIISH Severo-Vostoka, 2000. 258 s.

2. Drincha V. M. Investigation of Separation of Seeds and Development of Machine Technologies for their Preparation. Voronezh: Publishing house NGO "MODEK", 2006. 384 s.

3. Barskiy M. D. Fraktsionirovaniye poroshkov. M.: Nedra, 1980. 327 s.

4. Ermak V. P. Kontseptsiya aerodinamichnoyi separatsiyi nasinnya silskogospodarskih kultur ta zasobi yiyi realizatsiyi: avtoref. dis. ... d-ra tehn. nauk. Ternopil: TDAU, 2009. 39 s.

5. Koshulko V. S. Tendentsii razvitiya tehnologicheskikh i tehniceskikh sredstv dlya separatsii zernovyih materialov. *Hranenie i pererabotka zerna*. 2014. № 2 (179). S. 22–24.

6. Stepanenko S. P., Shvidya V. O., Popadyuk I. S. Analiz rozvitku konstruktivnykh pnevmoseparuyuchih sistem separatoriv. *Mehanizatsiya ta elektrifikatsiya silskogo gospodarstva: zagalnodержavnii zb. / NNTS "IMESG"*. Glevaha, 2017. Vip. № 5 (104). S. 132–142.

7. Zlochevskiy V. L., Terehova O. N. Povysheniye tehnologicheskoy effektivnosti pnevmofraktsionirovaniya zernovyih mass. *Hranenie i pererabotka zerna*. 2004. № 5 (59). S. 38–40.

8. Gortinskiy V. V., Demskiy A. B., Boriskin M. A. Protsessyi separirovaniya na zernopererabatyivayuschih predpriyatiyah. M.: Kolos, 1980. 304 s.

9. Vasilkovskiy M. I., Goncharova S. Ya., Leschenko S. M. Obgruntuvannya parametriv separatsiyi zerna v pohilomu povltryanomu pototsi. *Konstruyuvannya, virobnitstvo ta ekspluatatsiya silskogospodarskih mashin: zagalnodержavnii mIzhvldomchiy naukovotehnichniy zb.* Kirovograd: KNTU, 2007. Vip. 37. S. 132–137.

10. Kolodiy O. S. Obgruntuvannya konstruktivnotehnologichnih parametriv pnevmogravitatsiynogo separatora nasinnya sonyashnika: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. Melitopol: TDAU, 2015. 23 s.

11. Stepanenko S. P. Doslidzhennya protsesu pnevmatichnoyi separatsiyi nasinnya v kiltzovomu zigzagopodibnomu separatori. *Mehanizatsiya silskogospodarskogo virobnitstva: vIstnik Harkivskogo natsionalnogo tehnicnogo universitetu silskogo gospodarstva im. P. Vasilenka*. Harkiv: HNTUSG, 2008. Vip. 75. T. 1. S. 59–65.

12. Turon A. K. Pnevmoseparatsiya zerna v vertikalnom kanale s podgotovkoy v struynom ploskoparallelnom potoke: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. Novosibirsk: SIBIMESH, 1984. 19 s.

13. Sabashkin V. A. Razdeleniye melkosolomistogo voroha s predvaritelnoy podgotovkoy v struynom vozdushnom potoke: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. Novosibirsk: SIBIMESH, 1988. 18 s.

14. Nesterenko O. V. Obgruntuvannya parametriv pnevmoseparuyuchogo kanalu z bagatorivnevim vvedennyam zernovogo materiyalu: avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. Kropivnitskiy: TsNTU, 2017. 21 s.

15. Balistika krapel, yaki viparovuyutsya pri poloti / S. I. Kucherenko, V. P. Olshanskiy, S. V. Olshanskiy, L. M. Tischenko. Harkiv: HNTUSG, 2007. 203 s.

16. Stepanenko S. P., Kotov B. I., Spirin A. V. Do pitannya matematichnogo opisu ruhu

vimolochenogo nasinnya v kiltsevomu kanali zminnogo pererizu. *Mehanizatsiya silskogo-spodarskogo virobnitstva: visnik Harkivskogo natsionalnogo tehničnogo universitetu silskogo gospodarstva im. P. Vasilenka*. Harkiv: HNTUSG, 2017. Vip. 180. S. 330–339.

17. Stepanenko S. P. Research pneumatic gravity separation grain materials (Issledovanie vozdušnogravitatsionnoy separatsii zernovyih materialov). *Mechanization in Agriculture, conserving of the resources: International Scientific Journals of Scientific Technical Union of Mechanical Engineering "Industry 4.0"*. Bulgarian, 2017. Vol. 63. Issue 2. S. 54–56.

18. Modelyuvannya tehnologichnih protsesiv v tipovih ob'ektah pislyazbiralnoyi obrobki i zberigannya zerna (separatsiya, sushinnya, aktivne ventilyuvannya, oholodzhennya): monografiya / B. I. Kotov, R. A. Kalinichenko, S. P. Stepanenko, V. O. Shvyda, V. O. Lisetskiy. Nizhin: Vidavets PP Lisenko M. M., 2017. 552 s.

References

1. Burkov A. M., Sychugov M. P. Grain-cleaning machines. Design, research, calculation and testing. Kirov: From the NISIS of the North-East, 2000. 258 p.
2. Drincha V. M. Investigation of separation of seeds and development of machine technologies for their preparation. Voronezh: Publishing house NGO "MODEK", 2006. 384 p.
3. Barsky M. D. Fractionation of powders. M.: Nedra, 1980. 327 p.
4. Ermak V. P. Concept of aerodynamic separation of seeds of agricultural crops and means of its realization: author's abstract. dis ... Dr. Tech. sciences Ternopil: TDAU, 2009. 39 p.
5. Koshulko V. S. Trends in the development of technological and technical means for the separation of grain materials. *Storage and processing of grain*. 2014.No. 2 (179). Pp. 22–24.
6. Stepanenko S. P., Shvyda V. O., Popadyuk I. S. Analysis of the development of constructions of pneumatic separation systems of separators. *Mechanization and Electrification of Agriculture: National Sob. / NSC "IAEE"*. Glevakha, 2017. V. No. 5 (104). Pp. 132–142.
7. Zlochevsky V. L., Terekhova O. N. Improvement of Technological Efficiency of Pneum Fractionation of Grain Masses. *Storage and processing of grain*. 2004. No. 5 (59). Pp. 38–40.
8. Gortynsky V. V., Demsky A. B., Boriskin M. A. Separation processes at grain-processing enterprises. M.: Kolos, 1980. 304 p.
9. Vasilkovsky M. I., Goncharova S. Ya., Leshchenko S. M. Justification of parameters of grain separation in the inclined air flow. *Design, manufacture and operation of agricultural machines: the national interdepartmental scientific and technical library*. Kirovograd: KNTU, 2007. No. 37. Pp. 132–137.
10. Kolodiy O. S. Substantiation of structural and technological parameters of a pneumo-gravitation separator of sunflower seeds: author's abstract. dis ... Candidate tech sciences. Melitopol: TDAU, 2015. 23 p.
11. Stepanenko S. P. Investigation of the pneumatic seed separation process in a ring zigzag separator. *Mechanization of agricultural production: the journal of the Kharkiv National Technical University of Agriculture named after P. Vasilenko*. Kharkiv: KhNTUSG, 2008. No. 75. V. 1. Pp. 59–65.
12. Turov A. K. Pneumatic separation of grain in a vertical channel with preparation in a jet plane-parallel flow: author's abstract. dis ... Candidate tech sciences. Novosibirsk: SIBIMESK, 1984. 19 p.
13. Sabashkin V. A. Separation of a small-saline layer with preliminary preparation in a jet airflow: author's abstract. dis ... Candidate tech sciences. Novosibirsk: SIBIMESK, 1988. 18 p.
14. Nesterenko O. V. Justification of the parameters of the pneumocapacity channel with multi-level introduction of grain material: author's abstract. dis ... Candidate tech sciences. Kropivnitsky: TsNTU, 2017. 21 p.
15. Ballistics of droplets that evaporate during flight / S. I. Kucherenko, V. P. Olshansky, S. V. Olshansky, L. M. Tyshchenko. Kharkiv: KhNTUSG, 2007. 203 p.
16. 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: the journal of the Kharkiv National Technical University of Agriculture named after P. Vasilenko*. Kharkiv: KhNTUSG, 2017. No. 180. Pp. 330–339.
17. Stepanenko S. P. Research pneumatic gravity separation grain materials. *Mechanization in Agriculture, conserving of the resources: International Scientific Journals of Scientific Technical Union of Mechanical Engineering "Industry 4.0"*. Bulgarian, 2017. Vol. 63. Issue 2. Pp. 54–56.
18. 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. Shvyda, V. O. Lisetskiy. Nizhin: Publisher PE Lysenko M M, 2017. 552 p.