

DOI: <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2019-10-6>
УДК 631.362.3

Аналіз впливу нерівномірності швидкості повітряного потоку на траєкторії руху зернових частинок у пневмоінерційному сепараторі

Котов Б. І.,

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

Степаненко С. П.,

к.т.н., с.н.с., Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства», e-mail: stepanenko_s@ukr.net; ORCID iD 0000-0002-8331-4632

Анотація

Мета. Визначення впливу нерівномірного поля швидкості повітряного потоку в горизонтальному каналі пневмоінерційного сепаратора на ефективність поділу компонентів зернового матеріалу на фракції за аеродинамічними властивостями.

Методи. Специфіка питання, що розглядається, обумовлює аналітичний метод дослідження на основі складання й аналізу кінетичних рівнянь руху частинки у вигляді кулі в повітряному потоці горизонтального каналу з нерівномірним розподіленням швидкості повітряного потоку за висотою пневмоканалу.

Результати. Наведений математичний опис руху частинок зернової суміші в камері гравітаційно-повітряного сепаратора під час дії повітряного потоку повітря змінної швидкості. Отримано траєкторії руху частинок із різним розміром.

Отримане рівняння руху частинки під час дії потоку повітря дозволяє визначити залежність швидкості руху зернового матеріалу в його шарі від ряду факторів: геометричних параметрів сепаратора, кута подачі матеріалу, початкового

кінематичного режиму матеріалу K_0 , а також коефіцієнта парусності частинки.

Теоретично обґрунтовані технологічні можливості запропонованого способу сепарування зерна під час дії потоку повітря та встановлено вплив на технологічні показники основних параметрів: швидкості повітря, коефіцієнта живого перерізу з врахуванням товщини шару матеріалу, що надходить до каналу.

Висновки

1. На основі аналізу силової взаємодії частинки зернового матеріалу з повітряним потоком отримано вдосконалену математичну модель руху частинки в нерівномірному полі швидкості повітряного потоку в горизонтальному каналі.

2. Визначено реальну можливість керування процесом поділу компонентів зернового матеріалу за аеродинамічними властивостями внаслідок зміни епюри швидкості повітряного потоку за висотою горизонтального каналу.

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

DOI: <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2019-10-6>
UDC 631.362.3

Analysis of the influence of non-uniformity of air flow velocity on the trajectory of grain particles motion in a pneumatic inertial separator

Kotov B. I.,

Ph.D., prof., Podilsky State Agrarian and Technical University (PDATU); ORCID iD 0000-0001-6369-3025

Stepanenko S. P.,

Ph.D. in Technical Science, leading researcher, NSC "IAEE",
e-mail: stepanenko_s@ukr.net; ORCID iD 0000-0002-8331-4632

Annotation

Purpose. Determination of influence of non-uniform velocity field of air in horizontal channel of

pneumatic inertial separator on efficiency of separation of components of grain material into fractions by aerodynamic properties.

Methods. The specificity of the issue under consideration determines the analytical method of study based on the compilation and analysis of kinetic equations of motion of a particle, in the form of a ball in the air flow of a horizontal channel with uneven distribution of air flow velocity over the height of the pneumatic channel.

Results. The mathematical description of the motion of particles of the grain mixture in the chamber of the gravitational-air separator under the action of air flow of variable speed air is given. The trajectories of motion of particles of different size were obtained.

The obtained equation of motion of a particle under the action of air flow allows to determine the dependence of the speed of movement of the material in the layer of grain material on a number of factors: geometric parameters of the separator, the angle of feed of the material, the initial kinematic mode of the material, as well as the coefficient of sail of the particle.

The technological possibilities of the proposed method of grain separation under the action of air flow are theoretically substantiated and the influence on the technological parameters of the basic parameters: air velocity, coefficient of live section taking into account the layer thickness of the material entering the channel is established.

Conclusions

1. On the basis of the analysis of the force interaction of the grain material particle with the air stream, an advanced mathematical model of particle motion in a non-uniform field of air flow velocity in the horizontal channel was obtained.

2. The real possibility of controlling the process of separation of components of grain material by aerodynamic properties by changing the plot of the air flow velocity along the height of the horizontal channel is determined.

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

DOI: <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2019-10-6>
УДК 631.362.3

Анализ неравномерности скорости воздушного потока на траектории движения зерновых частиц в пневмоинерционном сепараторе

Котов Б. И.,

д.т.н., проф., Подольский государственный аграрно-технический университет (ПДАТУ);
ORCID iD 0000-0001-6369-3025

Степаненко С. П.,

к.т.н., с.н.с., Национальный научный центр «Институт механизации и электрификации сельского хозяйства», e-mail: stepanenko_s@ukr.net; ORCID iD 0000-0002-8331-4632

Аннотация

Цель. Определение влияния неравномерного поля скорости воздушного потока в горизонтальном канале пневмоинерционного сепаратора на эффективность разделения компонентов зернового материала на фракции по аэродинамическим свойствам.

Методы. Специфика рассматриваемого обуславливает аналитический метод исследования на основе составления и анализа кинетических уравнений движения частицы в виде шара в воздушном потоке горизонтального канала при неравномерном распределении скорости воздушного потока по высоте пневмоканала.

Результаты. Приведено математическое описание движения частиц зерновой смеси в камере гравитационно-воздушного сепаратора при воздействии воздушного потока воздуха переменной скорости. Получены траектории движения частиц с различным размером.

Полученное уравнение движения частицы при воздействии потока воздуха позволяет

определить зависимость скорости движения зернового материала в его слое от ряда факторов: геометрических параметров сепаратора, угла подачи материала, начального кинематического режима материала, а также коэффициента парусности частицы.

Теоретически обоснованы технологические возможности предлагаемого способа сепарирования зерна при воздействии потока воздуха и установлено влияние на технологические показатели основных параметров: скорости воздуха, коэффициента живого сечения с учетом толщины слоя материала, поступающего в канал.

Выводы

1. На основе анализа силового взаимодействия частицы зернового материала с воздушным потоком получена усовершенствованная математическая модель движения частицы в неравномерном поле скорости воздушного потока в горизонтальном канале.

2. Определена реальная возможность управления процессом разделения компонентов

зернового матеріала по аеродинамічним свойствам путем изменения эпюры скорости воздушного потока по высоте горизонтального канала.

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

Постановка проблеми. Одним із напрямів інтенсифікації процесів фракціонування зернових матеріалів є вдосконалення технологічних схем зерносепаруючих агрегатів (окремих робочих органів пневмосепаруючих систем). Одним із перспективних способів поділу компонентів зернового матеріалу за аеродинамічними властивостями є тонкошарова пневмоінерційна сепарація [1–3], в основу якої покладено швидкісну подачу зерна в повітряний потік, за протитечієвою схемою. Використання цього перспективного принципу дозволило свого часу розробити ряд ефективних установок для поділу дрібнодисперсного зернового вороху [20–24] на зернозбиральних комбайнах і в стаціонарних умовах. Але використання моделі з високим ступенем ідеалізації в дослідженнях пневмоінерційних сепараторів не дозволяє повністю виявити недоліки і переваги машин цього типу. Тому для визначення потенційних можливостей підвищення ефективності пневмоінерційного фракціонування зернових матеріалів необхідне більш детальне дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На основі аналізу існуючих способів і технічних засобів сепарації зернових матеріалів у роботах [1–3] зроблено висновок про реальну можливість підвищення ефективності процесу розділення компонентів повітряними потоками за аеродинамічними властивостями. У роботі [4] доведені технологічна і енергетична доцільність використання для поділу компонентів саме горизонтальних потоків повітря (горизонтальних повітряних каналів). У роботі [5–7] проведено аналіз траєкторій руху зернинки в горизонтальних потоках із нерівномірною і змінною швидкостями повітря. Показано [6], що збільшення швидкості повітря в напрямку його руху дозволяє збільшити розгалуження траєкторії і відповідно ефективність поділу компонентів. Але у вказаних роботах прийнято нерівномірний розподіл швидкості в поперечному перетині каналів, що не

повністю характеризує реальний процес. Водночас у роботі [8] визначено суттєвий вплив дії «поперечних» сил Жуковського і Магнуса на траєкторії руху частинки, що у вертикальному каналі призводить до їхнього зближення. У роботі [9] розглядається потік повітря зі змінною за висотою епюрою швидкості, але зумовлену градієнтом швидкості повітря дію додаткових сил не враховано.

У роботі [10] проаналізовано вплив градієнту швидкості повітря та його циркуляції навколо частинки і визначено факт зміни траєкторії під дією підіймальної сили Жуковського. У роботах [11, 12] розглянуто вплив обертання частинок і дію ефекту Магнуса на траєкторії їхнього руху. У роботі [13] на прикладі руху краплі, що обертається в повітряному потоці, розглянуто дію обох сил на переміщення краплі в горизонтальному потоці зі змінною за висотою швидкістю. Найбільш детально дію сил Жуковського і Магнуса розглянуто в роботі [14], там же подано методику визначення величини цих сил. Аналіз виконаних робіт підтвердив необхідність ретельного врахування всього комплексу діючих факторів у дослідженні механізму переміщення частинок у нерівномірних потоках, а також доцільність виявлення механізму компенсації негативного впливу дії «поперечних» сил або використання останніх для підвищення ефективності поділу.

Мета досліджень. Визначення впливу нерівномірного поля швидкості повітряного потоку в горизонтальному каналі пневмоінерційного сепаратора на ефективність поділу компонентів зернового матеріалу на фракції за аеродинамічними властивостями.

Методи досліджень. Специфіка питання, що розглядається, обумовлює аналітичний метод дослідження на основі складання й аналізу кінетичних рівнянь руху частинки у вигляді кулі в повітряному потоці горизонтального каналу з нерівномірним розподіленням швидкості повітряного потоку за висотою пневмоканалу.

Результати досліджень. Рух частинок у повітряному потоці залежить від таких факторів, як аеродинамічний опір частинки, швидкість повітряного потоку й їхній розподіл у поперечному перетині каналу та за довжиною, початкове значення швидкості частинки та кута вкидання її в повітряний потік. Тому для аналізу поділу частинок за

аеродинамічними властивостями доцільно отримати розрахункові траєкторії руху частинки.

Розглянемо рух частинки масою m з еквівалентним діаметром d поданої під

кутом α_0 зі швидкістю v_0 в горизонтальний повітряний канал. Середня витратна швидкість потоку повітря в каналі дорівнює $\bar{v}_n$ (рис. 1).

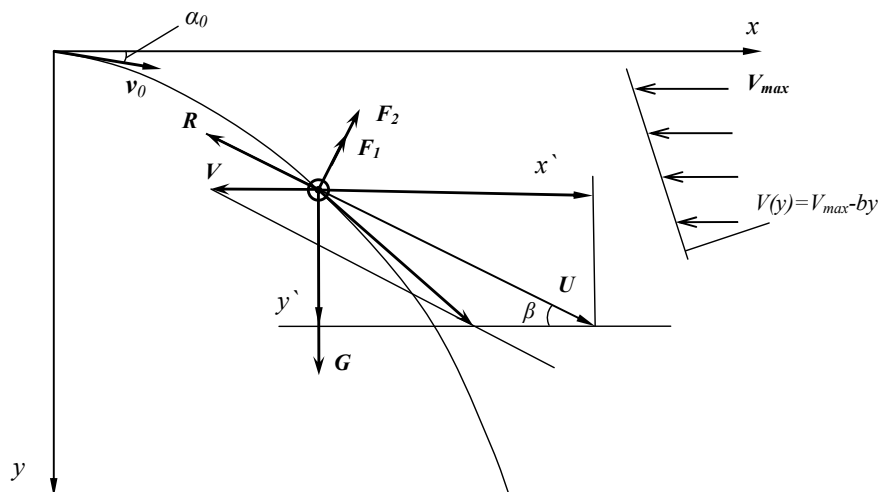


Рис. 1. Схема сил, що діють на частинку в нерівномірному повітряному потоці
Fig. 1. Scheme of forces acting on a particle in a non-uniform air stream

Швидкість частинки відносно нерухомої системи координат XOY дорівнює векторній сумі переносної $\bar{v}_n$ (повітряної) і відносної $\bar{u}$ швидкостей.

На частинку, що рухається в повітряному потоці, діють сили: тяжіння S_T , аеродинамічного опору R і бокові (або поперечні), які виникають за наявності градієнта швидкості потоку, що обтікає частинку (сила Жуковського), і під час обертання частинки, обтікаємої потоком навколо неї (сила F_2) відповідно до ефекту Магнуса.

Оскільки лінії дії сил F_1 і F_2 проходять через центр мас частинки, виникає момент M , який визначається силою аеродинамічного опору та її плечем відносно центру мас [14].

Рівняння руху частинки в повітряному потоці можна записати як

$$\begin{cases} m \frac{d\bar{v}}{dt} = \bar{R} + \bar{F}_1 + \bar{F}_2 \\ M = I \cdot \frac{d\omega}{dt}; \frac{d\varphi}{dt} = \omega \end{cases} \quad (1)$$

де I – момент інерції, $I = m \cdot r^2$;

r – радіус частинки;

ω – кутова швидкість обертання частинки.

Сила аеродинамічного опору визначається квадратичною залежністю від відносної швидкості повітря [18–20]:

$$R = C(R_e) \cdot S \cdot S_m \cdot \frac{u^2}{2}. \quad (2)$$

Величини бокових сил F_1 , F_2 , відповідно до теореми Н. Є. Жуковського, є пропорційними до відносної швидкості набігаючого потоку U і циркуляції Γ [14]:

$$F_1 = \rho u \Gamma_1; F_2 = \rho u \Gamma_2 \quad (3)$$

і спрямовані перпендикулярно (нормально) вектору відносної швидкості $\bar{u}$.

Для визначення значення відносної швидкості повітряного потоку необхідно знати (або задати) розподіл швидкості потоку в перетині каналу. Оскільки, як відомо з досліджень, наведених у роботах [5, 6, 9, 13–19], за існуючих природних форм розподілу швидкості повітря в каналах, швидкість у пограничному шарі стінок близька до нуля і градієнт швидкості спрямований до стінок каналу, то напрямок дії бокових сил призводить до зменшення розгалуження траєкторій. Тому доцільно розглянути штучне формування розподілу потоку повітря за висотою каналу так, щоби швидкість повітря біля верхньої стінки каналу (місце вводу зерна) була максимальною.

Прийmemo в першому наближенні лінійний закон розподілу швидкості за висотою $v(y)$, який уже досліджено в роботі [9]:

$$v(y) = v_{max} - b(y + d), \quad (4)$$

b – коефіцієнт пропорційності;
 v_{max} – відносна швидкість потоку повітря;
 d – діаметр зернинки.

$$u = [(v_{max} - b \cdot y) \cdot j + v_r], \quad (5)$$

де j – одиничний вектор осі ОУ.

Тоді циркуляція повітря на коловому контурі для нескінченного циліндра, радіус якого дорівнює радіусу частинки ($r = d/2$), визначиться так [14]:

$$\Gamma_1 = grad(u)_y \pi r_{\Pi}^2, \quad (6)$$

де $grad(u)_y = \frac{du}{dy} = -b$.

Величину бокової сили F_1 отримаємо підстановкою (6) у (3):

$$F_1 = \rho[(v_{max} - b \cdot y) \cdot j + v_r](-b) \pi r_{\Pi}^2. \quad (7)$$

Для сферичної частинки отримане значення відповідно до [14] помножимо на $\frac{3}{4} r_{\Pi}$ і матимемо:

Розкриваючи значення R, m, u , F_1, F_2 , отримаємо після перетворень:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -k_{\Pi}(\dot{x} + v_{\Pi})\sqrt{(\dot{x} + v_{\Pi})^2 + (\dot{y})^2} + \frac{\rho_v}{\rho_{\Pi}}[v_{max} - b \cdot y + v_r] \frac{\dot{y}}{\sqrt{(\dot{x} + v_{\Pi})^2 + (\dot{y})^2}} + \frac{\rho_v \omega}{2\rho_{\Pi}}[v_{max} - b \cdot y + v_r] \frac{\dot{y}}{\sqrt{(\dot{x} + v_{\Pi})^2 + (\dot{y})^2}}, \quad (12)$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = g - k_{\Pi}\dot{y}\sqrt{(\dot{x} + v_{\Pi})^2 + (\dot{y})^2} - \frac{\rho_v}{\rho_{\Pi}}[v_{max} - b \cdot y + v_r] \frac{(\dot{x} + v_{\Pi})}{\sqrt{(\dot{x} + v_{\Pi})^2 + (\dot{y})^2}} + \frac{\rho_v \omega}{2\rho_{\Pi}}[v_{max} - b \cdot y + v_r] \frac{(\dot{x} + v_{\Pi})}{\sqrt{(\dot{x} + v_{\Pi})^2 + (\dot{y})^2}}, \quad (13)$$

де $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$; $\dot{y} = \frac{dy}{dt}$; $\omega = \omega(t)$; $v_{\Pi} = v(y)$.

Для визначення зміни в часі частоти обертання частинки залежно від її розміру скористаємося диференціальним рівнянням обертання кулі [12]:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{15\mu\omega}{\rho_{\Pi}r^2}, \quad (14)$$

де μ – динамічний коефіцієнт в'язкості повітря.

Розв'язання рівняння (14) за початкової умови, що $t = 0$; $\omega = \omega_0$:

$$\omega(t) = \omega_0 e^{-k\omega t}, \quad (15)$$

де $k_{\omega} = \frac{15\mu}{\rho_{\Pi}r^2}$.

Розв'язання системи рівнянь (12), (13) з урахуванням (15) за початкових умов: $y(0) = y_0$; $x(0) = x_0$; $\dot{x}(0) = \frac{dx}{dt} = v_0 \cos \alpha_0$; $\dot{y}(0) = \frac{dy}{dt} = v_0 \sin \alpha_0$ отримаємо в комп'ютерному середовищі MathCad у вигляді траєкторій руху частинок із різними значеннями коефіцієнта вітривності k_{Π} і густини матеріалу частинки.

$$F_1 = \frac{3}{4} r_{\Pi}^3 \rho [(v_{max} - b \cdot y) \cdot j + v_r]. \quad (8)$$

Для випадку наявності обертального руху частинки під час переміщення в повітряному потоці з градієнтом швидкості величина циркуляції визначиться за формулою [14]:

$$\Gamma_2 = 2\pi r_{\Pi}^2 \omega, \quad (9)$$

а бокова сила від ефекту Магнуса на одиницю довжини еквівалентного циліндра визначиться так:

$$F_2 = 2\pi r_{\Pi}^2 \omega \rho [(v_{max} - b \cdot y) \cdot j + v_r]. \quad (10)$$

Для кулястої частинки – помножують на $\frac{4}{3} r_{\Pi}$.

Проектуючи визначені сили на осі ХОУ, отримаємо систему рівнянь:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = -R \frac{\dot{x} + v_{\Pi}}{u} + F_1 \frac{\dot{y}}{u} + F_2 \frac{\dot{y}}{u} \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} = mg - R \frac{\dot{y}}{u} - F_1 \frac{\dot{x} + v_{\Pi}}{u} + F_2 \frac{\dot{x} + v_{\Pi}}{u} \end{cases} \quad (11)$$

де $u^2 = (\dot{x} + v_{\Pi})^2 + (\dot{y})^2$; $R = m k_{\Pi} u^2$.

На рисунку 2 наведено траєкторії руху компонентів зернового матеріалу в рівномірному потоці.

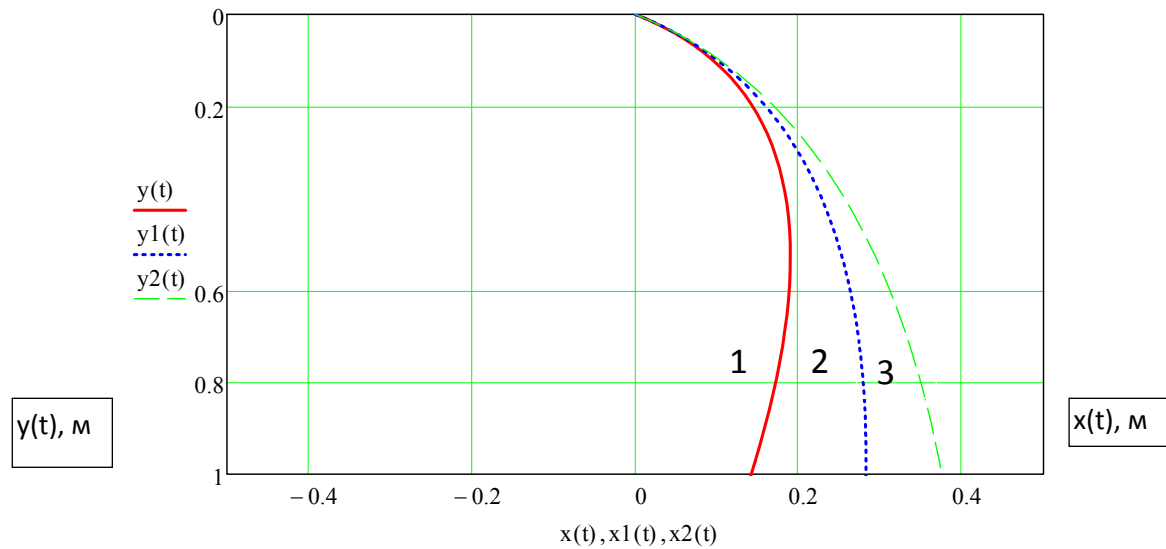


Рис. 2. Траєкторії руху компонентів зернового матеріалу з незмінною в напрямках координат швидкістю повітря:

$$1 - V_{\text{вум}} = 7,3 \frac{\text{м}}{\text{с}}; 2 - V_{\text{вум}} = 9 \frac{\text{м}}{\text{с}}; 3 - V_{\text{вум}} = 11 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Fig. 2. The trajectories of motion of the components of the grain material at constant velocity of air velocity:

$$1 - V_{\text{вум}} = 7,3 \frac{\text{м}}{\text{с}}; 2 - V_{\text{вум}} = 9 \frac{\text{м}}{\text{с}}; 3 - V_{\text{вум}} = 11 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Результати досліджень представлено у вигляді траєкторій руху частинок із різним значенням коефіцієнта вітрильності k_v (різні швидкості витання компонентів зернового матеріалу).

На рисунку 3 наведено траєкторії руху компонентів зернового матеріалу за лінійного розподілу швидкості повітря за висотою каналу ($v_y = v_{\text{max}} - b \cdot y$).

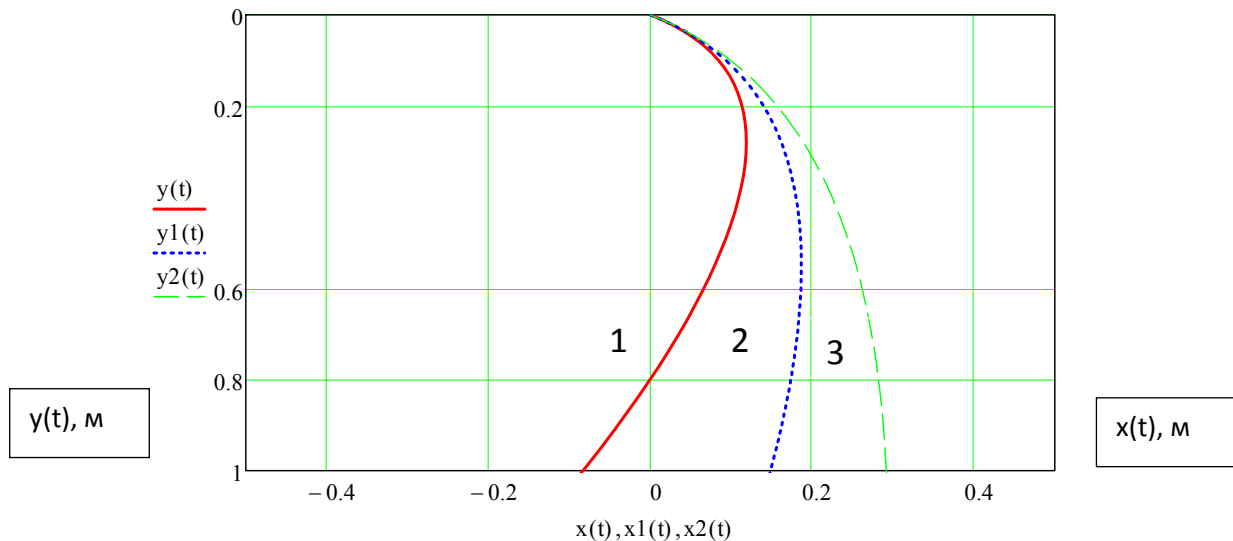


Рис. 3. Траєкторії руху частинок зі збільшенням швидкості повітряного потоку в напрямку його руху за лінійним законом:

$$1 - V_{\text{вум}} = 7,3 \frac{\text{м}}{\text{с}}; 2 - V_{\text{вум}} = 9 \frac{\text{м}}{\text{с}}; 3 - V_{\text{вум}} = 11 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Fig. 3. The trajectories of motion of particles with increasing air velocity in the direction of its motion according to linear law:

$$1 - V_{\text{вум}} = 7,3 \frac{\text{м}}{\text{с}}; 2 - V_{\text{вум}} = 9 \frac{\text{м}}{\text{с}}; 3 - V_{\text{вум}} = 11 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Аналізуючи отримані результати, можна зазначити, що за нерівномірного розподілу швидкості потоку повітря за висотою величина розщеплення траєкторій частинок збільшується, при цьому більш легкі фракції відхиляються на більшу відстань, ніж за рівномірного розподілу.

Отже, з'ясовано, що зміною епюри швидкості повітря в напрямку зменшення швидкості за висотою каналу можна керувати процесом поділу матеріалу.

Висновки

1. На основі аналізу силової взаємодії частинки зернового матеріалу з повітряним потоком отримано вдосконалену математичну модель руху частинки в нерівномірному полі швидкості повітряного потоку в горизонтальному каналі.

2. Визначено реальну можливість керування процесом поділу компонентів зернового матеріалу за аеродинамічними властивостями внаслідок зміни епюри швидкості повітряного потоку за висотою горизонтального каналу.

Бібліографія

1. Злочевский В. Л., Терехова О. Н. Повышение технологической эффективности пневмофракционирования зерновых масс. *Хранение и переработка зерна*. 2004. № 5 (50). С. 38–40.
2. Гиевский А. М. Повышение эффективности работы универсальных воздушно-решетных зерноочистительных машин : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Воронеж, 2016 40 с.
3. Степаненко С. П., Котов Б. І. Основні концептуальні положення пневматичного фракціонування зернових матеріалів. *Механізація та електрифікація сільськогосподарства* : загальнодержавний зб. / ННЦ «ІМЕСГ». 2018. Вип. № 8 (107). Глеваха, 2018. С. 80–88.
4. Ермак В. П. Концепція аеродинамічної сепарації насіння сільськогосподарських культур та засоби її реалізації : автореф. дис. д-ра техн. наук. Тернопіль, 2009. 39 с.
5. Котов Б. І., Степаненко С. П. Підвищення ефективності сепарації насіння з використанням протитечійної подачі матеріалу в горизонтальний повітряний потік. *Техніка, енергетика, транспорт АПК* : всеукраїнський науково-технічний журнал / ВНАУ. 2016. Вип. 3 (95). Вінниця, 2016. С. 121–125.
6. Котов Б. І., Степаненко С. П. Закономірності руху частинок в пневмогравітаційному сепараторі при змінній швидкості горизонтального потоку.

Сільськогосподарські машини : зб. наук. ст. Луцьк : РВВ Луцького НТУ, 2016. Вип. 35. С. 40–45.

7. Пивень В. В. Совершенствование технологического процесса очистки зерна фракционированием зернового вороха по аэродинамическим свойствам : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Челябинск, 1995. 36 с.
8. Злочевский В. Л. Интенсификация процесса аэродинамического разделения зерновых материалов : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Барнаул, 1986. 33 с.
9. Stepanenko S. P., Kotov B. I. Pneumonitis Fractionation of Grain Materials in Air Streams of Variable Structure. *TEKA. An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering. Lublin-Rzeszow*. 2018. Vol. 18. No. 2. Pp. 69–74.
10. Нелюбов А. И., Ветров Е. Ф. Пневмосепарирующие системы сельскохозяйственных машин. Москва : Машиностроение, 1967. 190 с.
11. Богомолов А. В. Учет вращения частицы зерновой смеси при движении ее в воздушном потоке. *Вісник ХДТУСГ*. Харків, 2002. Вип. 9. С. 5–13.
12. Ольшанський В. П., Ольшанський С. В. О траектории полета вращающейся сферической частицы. *Вісник ХНТУСГ*. Харків, 2009. Вип. 88. С. 54–61.
13. Онищенко Б. П. Теоретичні дослідження процесу осідання краплі. *Сільськогосподарські машини*. Луцьк, 2009. Вип. 18. С. 330–340.
14. Зуев Ф. Г. Пневматическое транспортирование на зерноперерабатывающих предприятиях. Москва : Колос, 1976. 344 с.
15. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. Москва : ГИФНЛ, 1973. 721 с.
16. Барский М. Д. Фракционирование порошков. Москва : Недра, 1980. 327 с.
17. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. Москва : Наука, 1974. 711 с.
18. Гортинский В. В., Демский А. Б., Борискин М. А. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях. Москва : Колос, 1980. 304 с.
19. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (сепарація, сушіння, активне вентилування, охолодження) : монографія / Б. І. Котов та ін. Ніжин, 2017. 552 с.
20. Stepanenko S., Rogovskii I., Titova L., Trokhaniak V., Trokhaniak O. Experimental study in a pneumatic microbiocature separator with apparatus camera. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*. 2019. Vol. 12 (61), No. 1. Pp. 117–128.

21. Stepanenko S. P., Rogovskii I. L., Titova L. L., Trokhaniak V. I., Solomka O. V., Popyk P. S., Shvidia V. O. Experimental studies on drying conditions of grain crops with high moisture content in low-pressure environment. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 57, Issue 1. Pp. 141–146. https://doi.org/10.35633/inmateh_57_15
22. Piven M., Volokh V., Piven A., Kharchenko S. Research into the process of loading the surface of a vibrosieve when a loose mixture is fed unevenly. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 6, No. 1 (96). Pp. 62–70. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.149739>
23. Vasylovskiy O., Vasylovskaya K., Moroz S., Sviren M., Storozhyk L. The influence of basic parameters of separating conveyor operation on grain cleaning quality. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2019. Vol. 57, No. 1. Pp. 63–70. https://doi.org/10.35633/inmateh_57_07
24. Nesterenko O. V., Leshchenko S. M., Vasylovskiy O. M., Petrenko D. I. Analytical assessment of the pneumatic separation quality in the process of grain multilayer feeding. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2017. Vol. 53, No. 3. Pp. 65–70.
8. Zlochevskij, V. L. (1986). Intensifikaciya processa aerodinamicheskogo razdeleniya zernovykh materialov. (Doctoral thesis). Barnaul.
9. Stepanenko, S. P., Kotov, B. I. (2018). Pneumonitis Fractionation of Grain Materials in Air Streams of Variable Structure. *TEKA. An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering*, 18, 2, 69–74.
10. Nelyubov, A. I., Vetrov, E. F. (1967). Pnevmostepariruyushchie sistemy sel'skohozyajstvennykh mashin. Moskva : Mashinostroenie.
11. Bogomolov, A. V. (2002). Uchet vrashcheniya chasticy zernovoy smesi pri dvizhenii ee v vozdušnom potoke. *Visnik HDTUSG*, 9, 5–13.
12. Ol'shans'kij, V. P., Ol'shans'kij, S. V. (2009). O traektorii poleta vrashchayushcheysya sfericheskoy chasticy. *Visnik HNTUSG*, 88, 54–61.
13. Onyshchenko, B. P. (2009). Teoretychni doslidzhennia protsesu osidannia krapli. *Silskohospodarski mashyny*, 18, 330–340.
14. Zuev, F. G. (1976). Pnevmaticheskoe transportirovanie na zernopererabatyvayushchih predpriyatiyah. Moskva : Kolos.
15. Lojcyanskij, L. G. (1973). Mekhanika zhidkosti i gaza. Moskva : GIFML.
16. Barskij, M. D. (1980). Frakcionirovanie poroshkov. Moskva : Nedra.
17. Shlihting, G. (1974). Teoriya pogranichnogo sloya. Moskva : Nauka.
18. Gortinskij, V. V., Demskij, A. B., Boriskin, M. A. (1980). Processy separirovaniya na zernopererabatyvayushchih predpriyatiyah. Moskva : Kolos.
19. (2017). Modeliuvannia tekhnolohichnykh protsesiv v typovykh ob'ekтах pisliabyrальноi obrobky i zberihannia zerna (separatsiia, sushinnia, aktyvne ventyliuvannia, okholodzhennia): monohrafiia. Nizhyn.
20. Stepanenko, S., Rogovskii, I., Titova, L., Trokhaniak, V., Trokhaniak, O. (2019). Experimental study in a pneumatic microbioculture separator with apparatus camera. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*, 12 (61), 1, 117–128.
21. Stepanenko, S. P., Rogovskii, I. L., Titova, L. L., Trokhaniak, V. I., Solomka, O. V., Popyk, P. S., Shvidia, V. O. (2019). Experimental studies on drying conditions of grain crops with high moisture content in low-pressure environment. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 57, 1, 141–146. https://doi.org/10.35633/inmateh_57_15
22. Piven, M., Volokh, V., Piven, A., Kharchenko, S. (2018). Research into the process of loading the surface of a vibrosieve when a loose mixture is fed unevenly. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6, 1 (96), 62–70. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.149739>

Бібліографія

1. Zlochevskij, V. L., Terekhova, O. N. (2004) Povyshenie tekhnologicheskoy effektivnosti pnevmofrakcionirovaniya zernovykh mass. *Hranenie i pererabotka zerna*, 5 (50), 38–40.
2. Gievskij, A. M. (2016). Povyshenie effektivnosti raboty universal'nykh vozdušno-reshetnykh zernoochistitel'nykh mashin. (Doctoral thesis). Voronezh.
3. Stepanenko, S. P., Kotov, B. I. (2018). Osnovni kontseptualni polozhennia pnevmatichnogo fraktsionuvannia zernovykh materialiv. *Mekhanizatsiia ta elektrifikatsiia silskoho hospodarstva*, № 8 (107), 80–88.
4. Ermak, V. P. (2009). Kontseptsiia aerodinamichnoi separatsii nasinnia silskohospodarskykh kultur ta zasoby yii realizatsii. (Doctoral thesis). Ternopil.
5. Kotov, B. I., Stepanenko, S. P. (2016). Pidvyshchennia efektyvnosti separatsii nasinnia z vykorystanniam protyechiinoi podachi materialu v horyzontalnyi povitrianyi potik. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*, 3 (95), 121–125.
6. Kotov, B. I., Stepanenko, S. P. (2016). Zakonomirnosti rukhu chastynok v pnevmohravitatsiinomu separatori pry zminni shvydkosti horyzontalnoho potoku. *Silskohospodarski mashyny : zb. nauk. st.*, 35, 40–45.
7. Piven', V. V. (1995). Sovershenstvovanie tekhnologicheskogo processa ochistki zerna frakcionirovaniem zernovogo voroha po aerodinamicheskim svoystvam. (Doctoral thesis). CHelyabinsk.

23. Vasylovskiy, O., Vasylovskaya, K., Moroz, S., Sviren, M., Storozhyk, L. (2019). The influence of basic parameters of separating conveyor operation on grain cleaning quality. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 57, 1, 63–70. https://doi.org/10.35633/inmateh_57_07

24. Nesterenko, O. V., Leshchenko, S. M., Vasylovskiy, O. M., Petrenko, D. I. (2017). Analytical assessment of the pneumatic separation quality in the process of grain multilayer feeding. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 53, 3, 65–70.

References

1. Zlochevsky, V. L., Terekhova, O. N. (2004). Improving the technological efficiency of pneumofractionation of grain masses. *Grain storage and processing*, 5 (50), 38–40.

2. Gievsky, A. M. (2016). Increasing the efficiency of universal air-sieve grain cleaning machines. (Doctoral thesis). Voronezh.

3. Stepanenko, S. P., Kotov, B. I. (2018). Basic conceptual provisions of pneumatic fractionation of grain materials. *Mechanization and electrification of agriculture*, 8 (107), 80–88.

4. Ermak, V. P. (2009). The concept of aerodynamic separation of agricultural seeds and means of its implementation. (Doctoral thesis). Ternopil.

5. Kotov, B. I., Stepanenko, S. P. (2016). Increasing the efficiency of seed separation with the use of counterflow material in the horizontal air flow. *AIC, Energy, Transport : All-Ukrainian scientific and technical journal*, 3 (95), 121–125.

6. Kotov B. I., Stepanenko S. P. (2016). Patterns of motion of particles in a pneumogravity separator at variable speed of horizontal flow. *Agricultural machinery*, 35, 40–45.

7. Piven, V. (1995). Century. Improving the technological process of grain cleaning by fractionation of grain heaps by aerodynamic properties. (Doctoral thesis). Chelyabinsk.

8. Zlochevsky, V. L. (1986). Intensification of the process of aerodynamic separation of grain materials. (Doctoral thesis). Barnaul.

9. Stepanenko, S. P., Kotov, B. I. (2018). Pneumofractionation of Grain Materials in Air Streams of Variable Structure. *TEKA. An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering*, 18, 2, 69–74.

10. Nelyubov, A. I., Vetrov, E. F. (1967). Pneumatic separation systems of agricultural machines. Moscow : Mechanical Engineering.

11. Bogomolov, A. V. (2002). Accounting for the rotation of a particle of a grain mixture when it moves in an air stream. *KhNTUSG Bulletin*, 9, 5–13.

12. Olshansky, V. P., Olshansky, S. V. (2009). On the flight path of a rotating spherical particle. *KhNTUSG Bulletin*, 88, 54–61.

13. Onishchenko, B. P. (2009). Theoretical studies of the process of sediment deposition. *Agricultural machinery*, 18, 330–340.

14. Zuev, F. G. (1976). Pneumatic transportation at grain processing enterprises. Moscow : Kolos.

15. Loytsyansky, L. G. (1973). Mechanics of liquid and gas. Moscow : GIFML.

16. Barsky, M. D. (1980). Fractionation of powders. Moscow : Nedra.

17. Schlichting, G. (1974). Theory of the boundary layer. Moscow : Nauka.

18. Gortinsky, V. V., Demsky, A. B., Boriskina, M. A. (1980). Separation processes at grain processing enterprises. Moscow : Kolos.

19. (2017). Modeling of technological processes in typical objects of post-harvest processing and storage of grain (separation, drying, active ventilation, cooling). Nizhyn.

20. Stepanenko, S., Rogovskii, I., Titova, L., Trokhaniak, V., Trokhaniak, O. (2019). Experimental study in a pneumatic microbioculture separator with apparatus camera. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering*, 12 (61), 1, 117–128.

21. Stepanenko, S. P., Rogovskii, I. L., Titova, L. L., Trokhaniak, V. I., Solomka, O. V., Popyk, P. S., Shvidia, V. O. (2019). Experimental studies on drying conditions of grain crops with high moisture content in low-pressure environment. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 57, 1, 141–146. https://doi.org/10.35633/inmateh_57_15

22. Piven, M., Volokh, V., Piven, A., Kharchenko, S. (2018). Research into the process of loading the surface of a vibrosieve when a loose mixture is fed unevenly. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6, 1 (96), 62–70. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.149739>

23. Vasylovskiy, O., Vasylovskaya, K., Moroz, S., Sviren, M., Storozhyk, L. (2019). The influence of basic parameters of separating conveyor operation on grain cleaning quality. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 57, 1, 63–70. https://doi.org/10.35633/inmateh_57_07

24. Nesterenko, O. V., Leshchenko, S. M., Vasylovskiy, O. M., Petrenko, D. I. (2017). Analytical assessment of the pneumatic separation quality in the process of grain multilayer feeding. *INMATEH – Agricultural Engineering*, 53, 3, 65–70.