

DOI: <https://doi.org/10.37204/0131-2189-2021-13-11>
УДК 631.362.3

Теоретичне визначення закономірностей плоского руху зернівки в нерівномірному повітряному потоці горизонтального пневмоканалу аеродинамічного сепаратора

Степаненко С. П.,

д.т.н., с.н.с., Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства»; ORCID iD 0000-0002-8331-4632

Котов Б. І.,

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

Анотація

Мета. Удосконалення математичного опису динаміки руху зернівки в горизонтальному нерівномірному повітряному потоці аеродинамічних сепараторів.

Методи. Теоретичне визначення закономірностей плоского руху зернівки в нерівномірному повітряному потоці обумовлює аналітичний метод дослідження на основі складання й аналізу рівнянь руху зернівок у вигляді кулі в повітряному потоці горизонтального пневмоканалу сепаратора. Математична модель сформульована внаслідок отримання диференціальних рівнянь руху компонентів зернового матеріалу, які представлені матеріальною точкою і комплексним показником аеродинамічних властивостей – коефіцієнтом вітрильності (парусності).

Результати. Розглянуто плоский рух зернівки в нерівномірному повітряному потоці горизонтального пневмоканалу аеродинамічного сепаратора, де крізь решітну поверхню зі щільними в осьовому напрямку всмоктується повітря і під дією утворених сил від впливу повітряного потоку на зернівку та з врахуванням додаткових бокових сил відбувається ефективна інтенсифікація фракціонування зернового матеріалу.

Отримане рівняння руху зернівки під час дії горизонтального потоку повітря дозволяє визначити залежність швидкості руху зернівок у повітряно-зерновому середовищі від ряду факторів: геометричних параметрів сепаратора, кута подачі матеріалу, початкового кінематичного режиму матеріалу, а також коефіцієнта вітрильності зернівок.

Висновки

1. Теоретично визначено закономірності плоского руху зернівки та вдосконалено математичну модель динаміки руху твердої частинки в горизонтальному потоці повітря, яка відрізняється від відомих тим, що відтворює дію неврахованих факторів (нерівномірність поля швидкості, дію бокових сил, концентрацію матеріалу). Встановлено, що зміна знаку градієнта потоку повітря у поперечному перетині призводить до зміни напрямку траєкторій легкої фракції КЗМ, що збільшує повноту видалення фуражної фракції до 90% і підвищує чіткість поділу насінневої фракції на 15–20% та забезпечує зменшення кількості повноцінного зерна у відходах до 2–3%. Зміна епюри швидкості повітря в горизонтальному каналі збільшує швидкість в пристінковій зоні, що дозволяє підвищити чіткість поділу на 18–24%.

2. Розв'язок системи нелінійних диференціальних рівнянь із початковими умовами виконано в програмному середовищі MathCad у вигляді траєкторій руху зернівки в горизонтальному повітряному потоці, що дозволяє розраховувати траєкторії руху зернівок, які різняться коефіцієнтами вітрильності, та визначити раціональні значення конструкційних параметрів пневмогравітаційних сепараторів.

Ключові слова: змінна швидкість повітря, траєкторія, бокова сила, фракції, горизонтальний повітряний потік, процес фракціонування, зернівка.

UDC 631.362.3

Theoretical determination of the regularities of the plane motion of the grain in the non-uniform air flow of the horizontal pneumatic channel of the aerodynamic separator

Stepanenko S. P.,

Dr.Tech. Sc., National Scientific Center “Institute of Agricultural Engineering and Electrification”;
ORCID iD 0000-0002-8331-4632

Kotov B. I.,

Dr.Tech. Sc., Prof., State Agrarian and Engineering University in Podilya;

ORCID iD 0000-0001-6369-3025

Annotation

Purpose. Improving the mathematical description of the motion of the dynamics of grain motion in the horizontal non-uniform air flow of aerodynamic separators.

Methods. Theoretical determination of the regularities of the plane motion of the grain in an uneven air flow determines the analytical method of research based on the compilation and analysis of the equations of motion of the grains in the form of a sphere in the air flow of the horizontal pneumatic channel of the separator. The mathematical model is formulated by obtaining differential equations of motion of the components of the grain material, which are represented by a material point and a complex indicator of aerodynamic properties – the coefficient of vitality (sail).

Results. The flat motion of the grain in the uneven air flow of the horizontal pneumatic channel of the aerodynamic separator through the sieve surface with cracks in the axial direction of air is absorbed.

The obtained equation of grain motion during horizontal air flow allows to determine the dependence of grain velocity in air-grain medium on a number of factors: geometric parameters of the separator, feed angle, initial kinematic mode of the material, and grain vitality coefficient.

Conclusions

1. An improved mathematical model of the dynamics of the motion of a solid particle in a horizontal air flow is formulated, which differs from those known in that it reproduces the action of unaccounted factors (non-uniformity of the velocity field, action of lateral forces, material concentration). It is established that the change of the sign of the air flow gradient in the cross section leads to a change in the direction of the trajectories of the light fraction KZM, which increases the completeness of the removal of the feed fraction to 90% and increases the separation of the seed fraction by 15–20% up to 2–3%. Changing the diagram of the air velocity in the horizontal channel increases the velocity in the wall area, which increases the clarity of the division by 18–24%.

2. The solution of the system of nonlinear differential equations with initial conditions is performed in the MathCad software environment in the form of grain motion trajectories in horizontal air flow, which allows calculating grain motion trajectories differing in vitality coefficients and determining rational values of pneumatic gravity separators.

Keywords: variable air velocity, trajectory, lateral force, fractions, horizontal air flow, fractionation process, grain.

УДК 631.362.3

Теоретическое определение закономерностей плоского движения зерновки в неравномерном воздушном потоке горизонтального пневмоканала аэродинамического сепаратора

Степаненко С. П.,

д-р.т.н., с.н.с., Национальный научный центр «Институт механизации и электрификации сельского хозяйства»; ORCID iD 0000-0002-8331-4632

Котов Б. И.,

д-р.т.н., проф., Подольский государственный аграрно-технический университет;

ORCID iD 0000-0001-6369-3025

Аннотация

Цель. Совершенствование математического описания динамики движения зерновки в горизонтальном неравномерном воздушном потоке аэродинамических сепараторов.

Методы. Теоретическое определение закономерностей плоского движения зерновки в неравномерном воздушном потоке обуславливает аналитический метод исследования на основе составления и анализа уравнений движения зерновок в виде шара в воздушном потоке горизонтального пневмоканала сепаратора. Математическая модель сформулирована путем полу-

чения дифференциальных уравнений движения компонентов зернового материала, которые представлены материальной точкой и комплексным показателем аэродинамических свойств – коэффициентом парусности.

Результаты. Рассмотрено плоское движение зерновки в неравномерном воздушном потоке горизонтального пневмоканала аэродинамического сепаратора, где через решетчатую поверхность со щелями в осевом направлении всасывается воздух и под действием образованных сил от воздействия воздушного потока на зерновку и с учетом дополнительных боковых сил происхо-

дит ефективна інтенсифікація фракціонування зернового матеріала.

Полученные уравнения движения зерновки во время действия горизонтального потока воздуха позволяют определить зависимость скорости движения зерновок в воздушно-зерновой среде от ряда факторов: геометрических параметров сепаратора, угла подачи материала, начального кинематического режима материала, а также коэффициента парусности зерновок.

Выводы

1. Теоретически определены закономерности плоского движения зерновки и усовершенствована математическая модель динамики движения твердой частицы в горизонтальном потоке воздуха, которая отличается от известных тем, что воспроизводит действие неучтенных факторов (неравномерность поля скорости, действие боковых сил, концентрацию материала). Установлено, что изменение знака градиента потока воздуха в поперечном сечении приводит к изменению направления траекторий легкой фракции КЗМ, что увеличивает полноту удаления фуражной фракции до 90% и повышает четкость разделения семенной фракции на 15–20% и обеспечивает уменьшение количества полноценного зерна в отходах до 2–3%. Изменение эпюры скорости воздуха в горизонтальном канале увеличивает скорость в пристеночной зоне, позволяет повысить четкость разделения на 18–24%.

2. Решение системы нелинейных дифференциальных уравнений с начальными условиями выполнено в программной среде MathCad в виде траекторий движения зерновки в горизонтальном воздушном потоке позволяет рассчитывать траектории движения зерновок, которые различаются коэффициентами парусности, и определить рациональные значения конструкционных параметров пневмогравитационных сепараторов.

Ключевые слова: переменная скорость воздуха, траектория, боковая сила, фракции, горизонтальный воздушный поток, процесс фракционирования, зерновка.

Постановка проблеми. Для отримання високоякісного продовольчого зерна та насіння разом із сучасними технологіями вирощування і збирання врожаю зернових і олійних культур необхідна інтенсивна післязбиральна обробка зернової маси з одночасним поділом її на товарні фракції (насінневу, продовольчу, фуражну та сміттєві відходи).

Зокрема, розділення (фракціонування) на першій стадії обробки свіжозібраної зернової маси можливо в разі використання повітряних зерносепаарувальних машин, які працюють за фракційною технологією. Тому

пневмосепаарувальний процес є одним із найважливіших у технології післязбиральної обробки зерна. Це зумовлено простотою і надійністю конструкцій пневмосепаарувальних систем і можливістю очищення зернового матеріалу підвищеної вологості та засміченості легкими компонентами. Незважаючи на широке застосування і певні переваги, сучасні пневмосепаарувальні машини мають низьку ефективність поділу компонентів зернового матеріалу за вищих енерговитрат, ніж решітні машини.

Пневмогравітаційні сепаратори практично використовують для очищення зерна від легких домішок, бо за принципом дії вони поділяють зерновий матеріал на дві фракції: основну та сміттєві домішки. Сепаратори з нахиленим пневмоканалом забезпечують поділ на три фракції, але мають незначну продуктивність і значні витрати енергії.

Суттєве збільшення продуктивності та багатофракційний поділ забезпечують аеродинамічні та пневмогравітаційні сепаратори, які використовують горизонтальні повітряні потоки в розділювальних установках. Сепаратори типу САД (4-50) забезпечують продуктивність від 4 до 50 т/год. Але їх створення і використання стримуються недостатньою вивченістю закономірностей силової взаємодії компонентів зернового матеріалу з нерівномірними і нестационарними повітряними потоками під дією додаткових (альтернативних) сил, які неоднозначно впливають на траекторії руху частинок в обмеженому просторі. Для підвищення ефективності й інтенсивності поділу компонентів зернового матеріалу, вдосконалення конструкцій розділювальних установок і оптимізації режимів їхнього функціонування треба більш детально визначити закономірностей процесу поділу; це можна досягти вдосконаленням математичного опису динаміки переміщення частинок у нерівномірних повітряних потоках.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Грунтовні теоретичні та експериментальні дослідження висвітлені у фундаментальних роботах А. Я. Маліса і А. Р. Демідова [1, 2], О. І. Нелюбова [3], В. В. Гортинського зі співавторами [4], які визначили основні фізичні механізми поділу компонентів дисперсного матеріалу за аеродинамічними властивостями і методами математичного опису динаміки руху частинок у вертикальних і нахилених повітряних каналах пневмосепаарувальних машин.

Як математичні моделі використані диференціальні рівняння руху частинок у рухомому необмеженому повітряному середовищі, формулювання яких найбільш детально висвітлено в роботах П. М. Василенка [5, 6], П. М. Заїки [7] для похилих каналів та їхнього попередника А. А. Кукибного [8]. Враховуючи, що рух повітряного середовища в просторі, обмеженому твердими стінками повітряних каналів, характеризується нерівномірним розподілом швидкості потоку [9] в поперечному перетині каналів, А. С. Матвеевим [10] була сформульована математична модель руху частинок у вертикальному каналі зі ступеневим розподілом швидкості повітря в прямокутному перетині. У роботах [22–24] використано логарифмічний розподіл швидкості повітряного потоку в кільцевому вертикальному каналі.

Моделюванню динаміки руху частинок в горизонтальному каналі присвячена незначна кількість наукових праць [11–15]. Як математичні моделі в усіх дослідженнях використано диференціальні рівняння руху частинки в рівномірному повітряному потоці, які сформульовані в роботах [1, 5, 6].

Водночас у роботі Ф. Г. Зуєва [16] доволі чітко сформульовано фізичний механізм виникнення бокових сил, зумовлених наявністю градієнтів швидкості повітря в каналі, які описуються ступеневим розподілом швидкості повітря в поперечному перетині каналу. У цій праці також наведено математичне визначення сил Жуковського і Магнуса. Доведено, що градієнтний рух повітря зумовлює обертання кулястої частинки навколо її осі.

Аналізуючи математичні моделі, наведені в розглянутих наукових працях, слід відмітити їхні недоліки, які утрудняють їх практичне використання для побудови та аналізу траєкторії руху частинок в горизонтальних пневмоканалах.

У роботах [11, 20] у формуванні математичного опису використано активні сили, які виникають за нестационарного руху повітряного потоку, а розглядається стаціонарний процес руху потоку так, як швидкість потоку в часі, незмінна. Сама модель наведена векторним рівнянням, яке в цій формі розв'язати неможливо. У роботах О. М. Гієвського [12], як і в попередній роботі А. А. Кукибного [8], відносна швидкість частинки визначається як її швидкість у нерухомому повітряному потоці, а переносною швидкістю частинки є швидкість руху повітряного потоку. Але

такий запис є некоректним, тому що в процесі руху частинки має місце її ковзання відносно рухомого повітря і переносна швидкість частинки буде меншою, ніж швидкість середовища, як справедливо вказує у своїй роботі В. В. Адамчук [17].

У роботі В. М. Булгакова зі співавторами [18] в описі руху частинки в каналі під дією сили опору повітряного потоку та збурювальної сили також не враховане це фізичне явище. В інших роботах [10, 13, 15, 19] використовують рівняння руху частинки в рівномірному горизонтальному потоці, які сформульовані на базі робіт [5, 6] і рекомендовані для використання в роботі [19], але ці рівняння не враховують особливостей силової взаємодії частинки з нерівномірним повітряним потоком, який має місце в пневмоканалах [16].

Ф. Г. Зуєвим [16] така модель сформульована для руху частинки в горизонтальному каналі пневмотранспортера. Але ця модель не містить параметрів бокової (верхньої) подачі матеріалу в канал (кута і початкової швидкості введення), тому в представленому вигляді модель не відтворює реальної картини процесу переміщення частинки в каналі і не дозволяє правильно визначити її траєкторію.

Мета досліджень. Удосконалення математичного опису динаміки руху зернівки в горизонтальному нерівномірному повітряному потоці аеродинамічних сепараторів.

Методи досліджень. Теоретичне визначення закономірностей плоского руху зернівки в нерівномірному повітряному потоці обумовлює аналітичний метод дослідження на основі складання й аналізу рівнянь руху зернівок у вигляді кулі в повітряному потоці горизонтального пневмоканалу сепаратора. Математична модель сформульована внаслідок отримання диференціальних рівнянь руху компонентів зернового матеріалу, які представлені матеріальною точкою і комплексним показником аеродинамічних властивостей – коефіцієнтом вітрильності (парусності).

Результати досліджень. У зв'язку з наявністю різних конструкцій пневмосепараторів із горизонтальним рухом повітряного потоку і значною складністю моделювання процесу математична модель (та її варіанти) сформульована внаслідок отримання диференціальних рівнянь руху компонентів зернового матеріалу, які представлені матеріальною точкою – масою m і комплексним показником аеродинамічних властивостей – коефіцієнтом

вітрильності (парусності) k_V , величина якого визначається співвідношеннями:

$$k_V = \frac{g}{V_{\text{віт}}^2} = \xi(Re) \rho \frac{S_M}{2m}, \quad (1)$$

де g – прискорення вільного падіння;

$V_{\text{віт}}$ – швидкість витання;

$\xi(Re)$ – коефіцієнт аеродинамічного опору,

$Re = \frac{du}{\nu}$; u – швидкість обтікання частинки

(відносна до швидкості повітря $V_{\text{П}}$);

ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості;

ρ – густина повітря;

$S_M = \frac{\pi d^2}{4}$ – площа міделевого перетину;

$d = 2r$ – діаметр кульової зернівки;

m – маса зернівки.

Розглядається плоский (площинний) рух частинки в прямокутних координатах

ХОУ за таких спрощувальних припущень, які ідеалізують розглянутий процес:

- частинка має форму кулі, яка не деформується і не взаємодіє з іншими частинками та стінками каналу;

- наявність частинок у каналі не впливає на характер руху повітряного потоку;

- повітряний потік стаціонарний, його параметри в часі незмінні, а швидкість повітря розподілена в поперечному перетині каналу за певним законом [9];

- на частинку внаслідок наявності градієнту швидкості повітряного потоку $\frac{\partial V}{\partial y} = f(y)$ діють бокові сили (сили Жуковського та ефект Магнуса).

Розглядається схема аеродинамічного класифікатора (сепаратор типу «віялка» або САД [21]), яка наведена на рисунку 1.

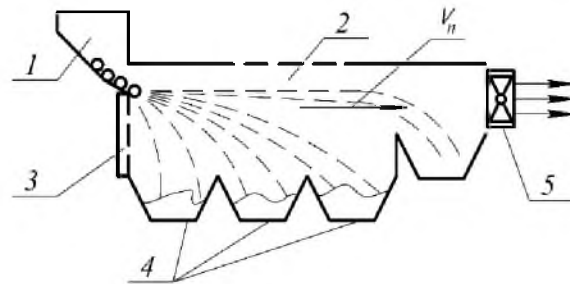


Рис. 1. Конструкційно-технологічна схема аеродинамічного сепаратора:

1 – бункер; 2 – повітряний канал; 3 – решітка; 4 – збірники фракцій; 5 – вентилятор

Fig. 1. Structural and technological scheme of the aerodynamic separator:

1 – bunker; 2 – air channel; 3 – lattice; 4 – collections of factions; 5 – fan

Схема силової взаємодії зернівки із горизонтальним потоком повітря, епюра швидкості якого описується степеневим законом (рух середовища між двома пластинами [9]), наведено на рисунку 2. Особливістю аеродинамічної схеми сепаратора-класифікатора є подача матеріалу в потік під кутом вводу α_0 в напрямку руху повітряного потоку (прямотечієва подача) або перехресна (подача під прямим кутом до потоку).

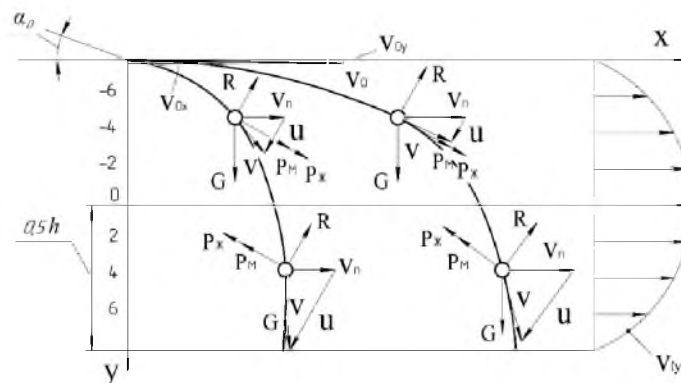


Рис. 2. Схема силової взаємодії зернівки з горизонтальним потоком повітря аеродинамічного сепаратора з прямотечієвою подачею матеріалу

Fig. 2. Scheme of the force interaction of the grain with the horizontal air flow of the aerodynamic separator with direct flow of material

Рух частинок зернового матеріалу, що відрізняються величиною коефіцієнта вітрильності k_v , відбувається під дією сил тяжіння G , аеродинамічного опору R середовища, а також бокових сил $P_{ж}, P_M$, що виникають унаслідок нерівномірності повітряного потоку в поперечному перетині каналу і за наявності обертального руху окремих зернівок (навколо своєї осі).

Сила опору повітряному потоку [4] визначається з урахуванням (1):

$$\bar{R} = k_v \bar{u}^2 = -k_v [\bar{V}_\Pi - \bar{V}]^2. \quad (2)$$

За умови прийняття припущень і визначених дієвих сил диференціальне рівняння руху зернівки в нерівномірному повітряному потоці можна записати у вигляді:

$$m \frac{d\bar{v}}{dt} = \bar{R} + \bar{G} + \bar{P}_M + \bar{P}_{ж}. \quad (3)$$

Проектуючи складові рівняння (3) відповідно до рисунка 1 на осі координат OXY , отримаємо координатну систему диференціальних рівнянь динаміки руху зернівки:

$$\begin{cases} m \frac{dV_x}{dt} = -mk_v \sin \alpha u^2 \pm P_{M(x)} \cos \alpha \pm P_{ж(x)} \cos \alpha, \\ m \frac{dV_y}{dt} = -mg - mk_v \cos \alpha u^2 \mp P_{M(y)} \sin \alpha \pm P_{ж(y)} \sin \alpha, \end{cases} \quad (4)$$

де $v_x = \frac{dx}{dt}$; $v_y = \frac{dy}{dt}$; $\sin \alpha = \frac{v_y}{u}$, $\cos \alpha = \frac{-v_x + v_\Pi}{u}$, $u = \sqrt{(v_\Pi - v_x)^2 - v_y^2}$;

u – відносна швидкість руху зернівки в потоці (швидкість обтікання зернівки повітрям);

α – кут між вектором абсолютної швидкості і віссю Ox ;

$P_{M(x)}, P_{ж(x)}, P_{M(y)}, P_{ж(y)}$ – проекції бокових сил при $v(y) = v_{max} \left(\frac{y}{h}\right)^{0,1}$; $m = \frac{\pi d^3}{6} \rho_r = \frac{4\pi r^3}{3} \rho_r$.

За аналогією із [16] запишемо рівняння для визначення модуля бокових сил $P_{M(x)}, P_{ж(x)}, P_{M(y)}, P_{ж(y)}$ у вигляді:

$$P_{ж(x)} = \frac{4}{3} \pi \rho r^3 \frac{v_{max}}{10 h^{0,1} y^{0,9}} |v_y|, \quad (5)$$

$$P_{M(x)} = \frac{8}{3} \pi \rho r^3 \cdot \omega \cdot v_y, \quad (6)$$

$$P_{ж(y)} = \frac{4}{3} \pi \rho r^3 \frac{v_{max}}{10 h^{0,1} y^{0,9}} \left[v_{max} \left(\frac{y}{h}\right)^{0,1} - v_x \right], \quad (7)$$

$$P_{M(y)} = \frac{8}{3} \pi \rho r^3 \cdot \omega \left[v_{max} \left(\frac{y}{h}\right)^{0,1} - v_x \right]. \quad (8)$$

Розкриваючи складові, що містять $\sin \alpha, \cos \alpha$, розділивши їх на величину m , з урахуванням прийнятих позначень остаточно запишемо:

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} = -k_v \left(v(y) - \frac{dx}{dt} \right) \sqrt{\left(v(y) - \frac{dx}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dt} \right)^2} \pm \frac{\rho_v}{\rho_r} \left[\frac{1}{2} \omega(t) + \frac{v_{max}}{10 h^{0,1} y^{0,9}} \right] \frac{dy}{dt}, \quad (9)$$

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} = -q - k_v \frac{dy}{dt} \sqrt{\left(v(y) - \frac{dx}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dt} \right)^2} \pm \frac{\rho_v}{\rho_r} \left[v_{max} \left(\frac{y}{h}\right)^{0,1} - \frac{dx}{dt} \right] \left(\frac{1}{2} \omega(t) + \frac{v_{max}}{10 h^{0,1} y^{0,9}} \right). \quad (10)$$

Початкові умови:

$$t(0) = 0; \frac{dx}{dt_{t=0}} v_0 \cos \alpha_0; \frac{dy}{dt_{t=0}} v_0 \sin \alpha_0. \quad (11)$$

Граничні умови:

$$y(0) = x(0) = x = y = 0; y < 0; (P_{ж} + P_{м}) > 0; \\ y > 0; (P_{ж} + P_{м}) < 0; -(y + 0,5 d_r) \leq y \leq (y + 0,5 d_r). \quad (12)$$

Розв'язок отриманої системи рівнянь (9), (10) при початкових і граничних умовах (11), (12) отримано в комп'ютерному середовищі *Mathcad* – 10 у вигляді залежності $x, y = f_1(t)$; $\dot{x}, \dot{y} = f_2(t)$ і траєкторій руху зернівок $x = f(y)$, наведених на рисунку 3.

На рисунку 3 наведено траєкторії руху зернівок за наявного степеневого розподілу швидкості потоку. Аналіз траєкторій зернівок з різними значеннями k_V дозволив у першому наближенні оцінити можливість поділу компонентів при прямотечієвому русі зернівок в повітряному потоці, а також встановити вплив дії окремих сил і режиму процесу сепарування на величину розщеплення траєкторій, яка визначає ефективність поділу.

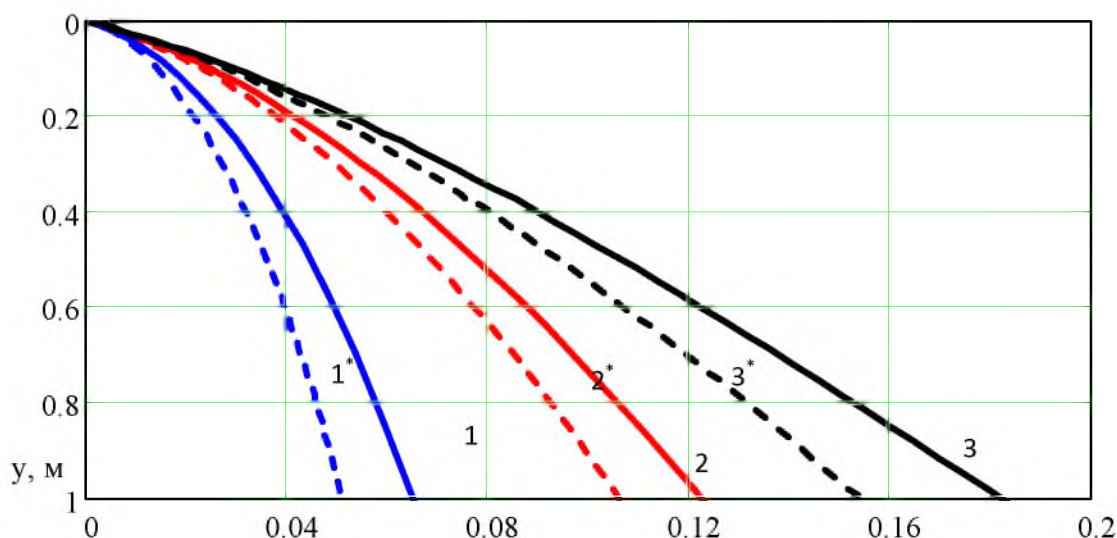


Рис. 3. Траєкторії руху зернівок із прямотечієвою подачею зернового матеріалу в повітряний потік:

1–3, відповідно $k_V = 0,139; 0,184; 0,392$ – без урахування бокових сил;

1*–3*, відповідно $k_V = 0,139; 0,184; 0,392$ – з урахуванням бокових сил

Fig. 3. The trajectories of the grains with the direct flow of grain material into the air stream:

1–3, respectively $k_V = 0.139; 0.184; 0.392$ – excluding lateral forces;

1*–3*, respectively $k_V = 0.139; 0.184; 0.392$ – taking into account the lateral forces

З аналізу траєкторій випливає, що дія бокових сил, викликана нерівномірною спорою швидкості повітря і негативно впливає на величину розщеплення траєкторій, тобто відстань між траєкторіями зростає. За відсутності дії поперечних сил розщеплення траєкторій збільшується.

Висновки

1. Теоретично визначено закономірності плоского руху зернівки та вдосконалено математичну модель динаміки руху твердої частинки в горизонтальному потоці повітря, яка відрізняється від відомих тим, що відтворює дію неврахованих факторів (нерівномірність поля швидкості, дію бокових сил, концентрацію матеріалу). Встановлено, що

зміна знаку градієнта потоку повітря у поперечному перетині призводить до зміни напрямку траєкторій легкої фракції КЗМ, що збільшує повноту видалення фуражної фракції до 90% і підвищує чіткість поділу насінневої фракції на 15–20% та забезпечує зменшення кількості повноцінного зерна у відходах до 2–3%. Зміна епюри швидкості повітря в горизонтальному каналі збільшує

швидкість в пристінковій зоні, що дозволяє підвищити чіткість поділу на 18–24%.

2. Розв'язок системи нелінійних диференціальних рівнянь із початковими умовами виконано в програмному середовищі MathCad у вигляді траєкторій руху зернівки в горизонтальному повітряному потоці, що дозволяє розраховувати траєкторії руху зернівок, які різняться коефіцієнтами вітрильності, та визначити раціональні значення конструкційних параметрів пневмогравітаційних сепараторів.

Бібліографія

1. Малис А. Я., Демидов А. Р. Машини для очистки зерна воздушным потоком. М. : Машгиз, 1962. 176 с.
2. Бурков А. И., Сычугон Н. П. Зерноочистительные машины. Конструкция, исследование, расчет и испытание. Киров : Изд-во НИИСХ Северо-Восток, 2000. 258 с.
3. Нелюбов А. О., Ветров Е. Ф. Пневмосепарирующие системы сельскохозяйственных машин. М. : Машиностроение, 1977. 192 с.
4. Гортинский В. В., Демский А. Б., Борискин М. А. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях. М. : Колос, 1980. 304 с.
5. Василенко П. М. Об уравнениях транспортировки частиц в сопротивляющихся средах. Доклады ВАСХНИЛ. 1970. № 4. С. 3–15.
6. Василенко П. М. Введение в земледельческую механику : монография / под ред. академика Л. В. Погорелого. К. : Сільгосптехніка, 1996. 252 с.
7. Заїка П. М. Очистка і сортування насіння. Теорія сільськогосподарських машин. Харків : Око, 2006. Т. 3. Ч. 7. 407 с.
8. Кукибний А. А. Свободный полет зерен в подвижной среде. Труды Киевского технологического института (Киевский университет). 1960. Вып. 22. С. 123–132.
9. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М. : ГИФМЛ, 1973. 787 с.
10. Матвеев А. С. Исследование процесса сепарирования зерновых смесей вертикально-восходящим воздушным потоком : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва : ВИМ, 1973. 30 с.
11. Алієв Є. Б., Яропуд В. М. Фізико-математичний апарат руху насіння в повітряному потоці. Техніка, енергетика, транспорт АПК. Вінниця, 2017. № 2. С. 19–23.
12. Гиевский А. М. Повышение эффективности работы универсальных воздушно-решетных зерноочистительных машин : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Воронежский государственный аграрный университет. Воронеж, 2016. 40 с.
13. Єрмак В. П. Концепція аеродинамічної сепарації насіння сільськогосподарських культур

та засоби її реалізації : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / ТДТУ ім. І. Пулюя. Тернопіль, 2009. 39 с.

14. Єрмак В. П. Шляхи збільшення ефективності сепарування насіння у горизонтальному повітряному потоці. Зб. наук. праць Луганського НАУ. Луганськ, 2004. Вип. 42. С. 66–72.

15. Пивень В. В. Пневмообогащение невейного зернового вороха в попутном воздушном потоке. Повышение производительности и качества работы зерноуборочных машин. Челябинск : ЧИМЭСХ, 1986. С. 125–129.

16. Зуєв Ф. Г. Пневматическое транспортирование на зерноперерабатывающих предприятиях. М. : Колос, 1979. 344 с.

17. Адамчук В. В. Теоретичне дослідження руху частинки технологічного матеріалу в повітряному середовищі в умовах вітру і супроводжуючого повітряного струменю. Промислова гідраліка і пневматика. 2005. № 1 (7). С. 47–52.

18. V. Bulgakov, S. Nikolaenko, I. Holovach, A. Boris, S. Kiurchev, Ye. Ihnatiev, and J. Olt. (2020). Theory of motion of grain mixture particle in the process of aspiration separation. *Agronomy Research*, 18 (S2), 1177–1188 <https://doi.org/10.15159/AR.20.069>.

19. Вожик Ю. Г. Анализ работы тукоразбрасывающих аппаратов. Механизация и электрификация сельского хозяйства. Киев : Урожай, 1976. Вып. 37. С. 11–17.

20. Злочевський В. Л. Інтенсифікація процесу аеродинамічного розділення зернових матеріалів : автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Новосибірськ : СибІМЭ СО ВАСХНИЛ, 1986. 35 с.

21. Бабаяну О. В. Сепараторы САД – надежный помощник для получения высококачественных и здоровых семян. Новини агротехніки. 2009. № 1. С. 32–33.

22. Степаненко С. П., Котов Б. І. Основні концептуальні положення пневматичного фракціонування зернових матеріалів. Механізація та електрифікація сільського господарства : загальнодерж. зб. Глеваха, 2018. Вип. № 8 (107). С. 80–88.

23. Котов Б. І., Степаненко С. П. Основні теоретичні положення сепарації зернового матеріалу в повітряних каналах з нерівномірною швидкістю повітряного потоку. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвідомчий науково-техн. зб. Кропивницький : ЦНТУ, 2020. Вип. 50. С. 122–133.

24. Котов Б. І., Степаненко С. П. Математичне моделювання процесів поділу компонентів зернового матеріалу в комбінованому вібраційно-повітряному сепараторі *Вібрації в техніці та технологіях* : Всеукраїнський науково-технічний журнал / Вінницький національний аграрний університет. Вип. № 2 (97). Вінниця, 2020. С. 51–61.

Bibliografii

1. Malis, A. YA., Demidov, A. R. (1962). *Mashiny dlya ochistki zerna vozdushnym potokom*. M. : Mashgiz. 176 s.
2. Burkov, A. I., Sychugov, N. P. (2000). *Zernoochistitel'nyye mashiny. Konstruktsiya, issledovaniye, raschet i ispytaniye*. Kirov : Izd-vo NIISKH Severo-Vostok. 258 s.
3. Nelyubov, A. O., Vetrov, Ye. F. (1977). *Pnevmostsepariruyushchiye sistemy sel'skokhozyaystvennykh mashin*. M. : Mashinostroyeniye. 192 s.
4. Gortinskiy, V. V., Demskiy, A. B., Boriskin, M. A. (1980). *Protsesty separirovaniya na zernopererabatyvayushchikh predpriyatiyakh*. M. : Kolos. 304 s.
5. Vasilenko, P. M. (1970). *Ob uravneniyakh transportirovki chastits v soprotivlyayushchikhsya sredakh*. *Doklady VASKHNIL*, 4, 3–15.
6. Vasilenko, P. M. (1996). *Vvedeniye v zemledel'cheskuyu mekhaniku : monografiya / pod red. akademika L. V. Pogorelogo*. Kiyev : Sil'gospstekhnika. 252 s.
7. Zaika, P. M. (2006). *Ochistka i sortovannya nasinnya. Teoriya sil'skogospodarskikh mashin*. Kharkiv : Oko. T. 3, ch. 7. 407 s.
8. Kukibniy, A. A. (1960). *Svobodnyy polet zeren v podvizhnoy srede*. *Trudy Kiyevskogo tekhnologicheskogo instituta* (Kiyevskiy universitet), 22, 123–132.
9. Loytsyanskiy, L. G. (1973). *Mekhanika zhidkosti i gaza*. M. : GIFML. 787 s.
10. Matveyev, A. S. (1973). *Issledovaniye protsesta separirovaniya zernovykh smesey vertikal'no-voskhodyashchim vozdushnym potokom : avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk*. Moskva : VIM. 30 s.
11. Aliev, E. B., Yaropud, V. M. (2017). *Fiziko-matematichniy apparat rukhu nasinnya v povitryanomu pototsi*. *Tekhnika, yenergetika, transport APK*, 2, 19–23. Vinnitsya.
12. Giyevskiy, A. M. (2016). *Povysheniye effektivnosti raboty universal'nykh vozdušno-reshetnykh zernoochistitel'nykh mashin : avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk / Voronezhskiy gosudarstvennyy agrarnyy universitet*. Voronezh. 40 s.
13. Ermak, V. P. (2009). *Kontseptsiya ayerodinamichnoi separatsii nasinnya sil'skogospodarskikh kul'tur ta zasobi її realizatsii : avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk / TDTU im. I. Pulyuya. Ternopil'*. 39 s.
14. Ermak, V. P. (2004). *Shlyakhi zbil'sheniya yefektivnosti separuvannya nasinnya u gorizontal'nomu povitryanomu pototsi*. *Zb. nauk. prats' Lugans'kogo NAU*, 42, 66–72. Lugans'k.
15. Piven', V. V. (1986). *Pnevmoobogashcheniye neveyanogo zernovogo vorokha v poputnom vozdushnom potoke. Povysheniye proizvoditel'nosti i kachestva raboty zernouborochnykh mashin*, 125–129. Chelyabinsk : CHIMESKH.
16. Zuév, F. G. (1979). *Pnevmaticheskoye transportirovaniye na zernopererabatyvayushchikh predpriyatiyakh*. M. : Kolos. 344 s.
17. Adamchuk, V. V. (2005). *Teoretichne doslidzhennya rukhu chastinki tekhnologichnogo materialu v povitryanomu seredovishchi v umovakh vitru i suprovodzhuyuchogo povitryanogo strumenyu*. *Promislova gidravlika i pnevmatika*, 1 (7), 47–52.
18. V. Bulgakov, S. Nikolaenko, I. Holovach, A. Boris, S. Kiurchev, Ye. Ihnatiev, and J. Olt. (2020). *Theory of motion of grain mixture particle in the process of aspiration separation*. *Agronomy Research*, 18 (S2), 1177–1188 <https://doi.org/10.15159/AR.20.069>.
19. Vozhik, YU. G. (1976). *Analiz raboty tukorazbrasyvayushchikh apparatov*. *Mekhanizatsiya i yelektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*, 37, 11–17. Kiyev : Urozhay.
20. Zlochev'skiy, V. L. (1986). *Intensifikatsiya protsesta aerodinamicheskogo razdeleniya zernovykh materialov : avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk*. Novosibirsk : SibIME SO VASKHNIL.
21. Babayanu, O. V. (2009). *Separatori SAD – nadezhnyy pomoshchnik dlya polucheniya vysokokachestvennykh i zdorovykh semyan*. *Novini agrotekhniki*, 1, 32–33.
22. Stepanenko, S. P., Kotov, B. Í. (2018). *Osnovni kontseptual'ni polozhennya pnevmatichnogo fraksionuvannya zernovykh materialiv*. *Mekhanizatsiya ta yelektrifikatsiya sil'skogo gospodarstva : zagal'noderzhavniy zbirnik*, 8 (107), 80–88. Glevakha.
23. Kotov, B. Í., Stepanenko, S. P. (2020). *Osnovni teoretichni polozhennya separatsii zernovogo materialu v povitryanikh kanalakh z nerivnomirnoyu shvidkistyu povitryanogo potoku*. *Konstruyuvannya, virobnitstvo ta yekspluatatsiya sil'skogospodarskikh mashin : zagal'noderzhavniy mizhvidomchiiy naukovotekhnichniy zbirnik*, 50, 122–133. Kropivnits'kiy : TSNTU.
24. Kotov, B. Í., Stepanenko, S. P. *Matematichne modelyuvannya protsesiv podilu komponentiv zernovogo materialu v kombinovanomu vibratsiynopovitryanomu separatori*. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnologiyakh : Vseukraïns'kiy naukovotekhnichniy zhurnal*, 2 (97), 51–61 / Vinnits'kiy natsional'niy agrarniy universitet. Vinnitsya.

References

1. Malis, A. Ya., & Demidov A. R. (1962). *Machines for cleaning grain with air flow*. M. : Mashgiz [in Russian].
2. Burkov, A. I., & Sychugov, N. P. (2000). *Grain cleaning machines. Construction, research, calculation and testing*. Kirov : NIISH Severo-Vostok Publishing House [in Russian].
3. Nelyubov, A. O., & Vetrov, E. F. (1977). *Pneumatic separation systems of agricultural machines*. Moscow : Mechanical Engineering [in Russian].

4. Gortinskiy, V. V., Demskiy, A. B., & Boriskin, M. A. (1980). Separation processes at grain processing enterprises. Moscow : Kolos [in Russian].
5. Vasilenko, P. M. (1970). On the equations of particle transportation in resisting media. *Reports of VASKHNIL*, 4, 3–15 [in Ukrainian].
6. Vasilenko, P. M. (1996). Introduction to agricultural mechanics : monograph / edited by academician L. V. Pogorely. Kyiv : Silgosptekhnika [in Ukrainian].
7. Zayika, P. M. (2006). Cleaning and sorting of seeds. *Theory of silskogospodarsky machines*. Kharkiv : Oko. Vol. 3, part 7 [in Ukrainian].
8. Kukibniy, A. A. (1960). Free flight of grains in a mobile environment. *Proceedings of the Kiev Institute of Technology (Kiev University)*, 22, 123–132 [in Ukrainian].
9. Loytsyansky, L. G. (1973). Mechanics of liquid and gas. Moscow : GIFML [in Russian].
10. Matveev, A. S. (1973). Study of the process of separation of grain mixtures vertically-ascending air flow : author. dis. ... cand. tech. sciences. Moscow : VIM [in Russian].
11. Aliyev, E. B., & Yaropud, V. M. (2017). Physics and mathematics apparatus for everyday life in daily flow. *Technology, energy, transport of the agro-industrial complex*, 2, 19–23. Vinnytsia [in Ukrainian].
12. Gievsky, A. M. (2016). Improving the efficiency of universal air-sieve grain cleaning machines : author. dis. ... dr. tech. sciences / Voronezh State Agrarian University. Voronezh [in Russian].
13. Urmak, V. P. (2009). Concept of aerodynamic separation of modern agricultural cultures and the way of realizing : author. dis. ... dr. tech. sciences / TDTU im. I. Bullet. Ternopil [in Ukrainian].
14. Urmak, V. P. (2004). Ways to increase the effectiveness of seed separation in a horizontal air flow. *Collection of scientific works of Lugansk NAU*, 42, 66–72. Luhansk [in Ukrainian].
15. Piven, V. V. (1986). Pneumatic enrichment of an inexperienced grain heap in a concomitant air stream. *Increase in productivity and quality of work of grain harvesters*, 125–129. Chelyabinsk : CHIMESH [in Russian].
16. Zuev, F.G. (1979). Pneumatic transportation at grain processing enterprises. Moscow : Kolos [in Russian].
17. Adamchuk, V. V. (2005). Theoretically, to the end of a piece of technological material in the mind of the wind and super-live power tool. *Promislova hydraulika and pneumatics*, 1 (7), 47–52 [in Ukrainian].
18. V. Bulgakov, S. Nikolaenko, I. Holovach, A. Boris, S. Kiurchev, Ye. Ihnatiev, and J. Olt. (2020). Theory of motion of grain mixture particle in the process of aspiration separation. *Agronomy Research*, 18 (S2), 1177–1188 <https://doi.org/10.15159/AR.20.069> [in Latvia].
19. Vozhik, Yu. G. (1976). Analysis of the operation of fertilizer spreading devices. *Mechanization and electrification of agriculture*, 37, 11–17. Kiev : Harvest [in Ukrainian].
20. Zlochevsky, V. L. (1986). Intensification of the process of aerodynamic separation of grain materials : author. dis. ... dr. tech. sciences. Novosibirsk : SibIME SO VASKHNIL [in Russian].
21. Babayanu, O. V. (2009). Separatori SAD is a reliable assistant for obtaining high-quality and healthy seeds. *News of agrotechnics*, 1, 32–33 [in Ukrainian].
22. Stepanenko, S. P., & Kotov, B. I. (2018). Basic conceptual provision of pneumatic fractionation of grain materials. *Mechanization and electrification of agriculture : nationwide collection*, 8 (107), 80–88. Glevakha [in Ukrainian].
23. Kotov, B. I., & Stepanenko, S. P. (2020). The main theoretical provisions for the separation of grain material in the winding canals with the unreasonable speed of the flow. *Design, production and operation of agricultural machines : national interagency scientific and technical collection*, 50, 122–133. Kropyvnytskyi : TsNTU [in Ukrainian].
24. Kotov, B. I., & Stepanenko, S. P. (2020). Mathematical modeling of processes in the subsurface of the components of grain material in the combined grain-and-food separator. *Vibratsii v tekhnitsi and tekhnnyakh* : All-Ukrainian science and technology journal, 2 (97), 51–61 / Vinnytsia National Agrarian University. Vinnytsia [in Ukrainian].