

water supply to the subsoil space of the root system of plants are calculated. In the area under vegetable crops, a container for fertigation was used - the introduction of liquid into the irrigation system to feed the plants, to protect them from stress, improve development and increase yields. A series of studies was conducted to provide moisture to the area in the area of root formation and preservation of soil air exchange and their impact on tomato yield. The use of injectable drip irrigation has increased yields by up to 40% while saving water.

Thus, with the change of climatic conditions, most of the Kirovohrad region fell into the zone of risky agriculture, due to which there was an urgent need for the use of irrigation systems for agricultural plants. Injection-type drip irrigation is most effective in intensive cultivation of row crops and vegetables, when the condition of the plant largely depends on the accuracy of maintaining the humidity in the root zone and plant nutrition. Drip irrigation of the injection type allows you to increase the yield of vegetable crops while economically using water resources.

**climate change, drip irrigation, injection type, microtube, root system**

*Одержано (Received) 18.10.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 24.10.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021*

УДК 631.632.3

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.20-35>

**Б. І. Котов**, проф., д-р. техн. наук

*Подільський державний аграрно-технічний університет (ПДАТУ), м. Кам'янець-Подільський, Україна*

**С. П. Степаненко**, д-р техн. наук, ст. наук. співр.

*Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства», смт Глеваха, Фастівський р-н, Київська обл., Україна*

*e-mail: [stepanenko\\_s@ukr.net](mailto:stepanenko_s@ukr.net)*

## Теоретичні дослідження руху компонентів зернового матеріалу із штучно сформованим розподілом швидкості повітря в поперечному перетині каналу

В статті розглядаються дослідження поділу зернових матеріалів у пневматичних каналах із штучно сформованим розподілом швидкості повітря в поперечному перетині каналу, для визначення раціональної форми та параметрів подачі матеріалу та варіантів поділу зернового матеріалу на фракції.

Теоретично досліджено та встановлено закономірності руху зернівки у вигляді математичних моделей динаміки руху твердої частки в потоці повітря, які відрізняються від відомих тим, що враховують дію бокових сил, концентрацію матеріалу, а застосування степеневого закону та штучно сформованого експоненціального закону розподілу повітря дало можливість підвищити розходження (розщеплення) траєкторій руху зернівок на 20%.

Розв'язок системи нелінійних диференційних рівнянь із початковими умовами виконано в програмному середовищі MathCad у вигляді траєкторій руху зернівки в повітряному потоці, що дозволяє розраховувати їх траєкторії руху, які різняться коефіцієнтами парусності та визначити раціональні значення параметрів пневмогравітаційних та пневмоінерційних сепараторів.

Використовуючи отримані залежності для розробки повітряних сепараторів, можна визначити початкову швидкість введення і напрямок входження зернівок у повітряний потік, а також визначити траєкторії руху матеріалу в повітряних каналах з нижнім вивантаженням матеріалу.

**потік повітря, зернівка, сили Жуковського та Магнуса, траєкторія, процес поділу, пневматичний сепаратор**

**Постановка проблеми.** Рішення проблеми розділення багатокomпонентного зернового матеріалу на окремі фракції певного цільового призначення (насіння, товарне зерно, фураж) на стадії первинної обробки зерна дозволить скоротити кількість і продуктивність машин вторинної і спеціальної обробки кондиційного зерна. Перспективним напрямом підвищення ефективності післязбиральної обробки зерна в зернопродуруючих є застосування на першій стадії пневмосепаруючих машин, функціонування яких не залежить від вихідної вологості зерна. Однак у виробничих умовах ефективність розділення зернового матеріалу коливається в межах від 30 до 60% в залежності від етапу обробки.

Проведеними дослідженнями визначено рекомендації до конструювання, вибору параметрів і режимів роботи пневмосепаруючих каналів. Але подальше покращення якості розділення компонентів зернового матеріалу (КЗМ) утруднено не вирішенням питань зниження негативного впливу на ефективність поділу нерівномірності полів швидкостей повітряного потоку за шириною вертикальних та висотою горизонтальних каналів.

Вирівнювання поля швидкостей гофрованими пластинчастими решітками (на вході або виході каналу) неоднозначно впливає на ефективність поділу і потребують додаткового обслуговування. Останнім часом з'явилися пневмосепаратори із заслінками з регулюванням кута розкриття (генератори каскаду повітряних струменів). Встановлення оптимальної епюри швидкостей для вертикальних і горизонтальних каналів є сутністю необхідних досліджень, щодо підвищення ефективності поділу КЗМ, які полягають у потребі визначення впливу штучно створеної епюри швидкостей на величину розходження траєкторій і визначення раціонального профілю поля швидкостей повітряних потоків в каналах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Основні концептуальні положення пневматичного поділу КЗМ на фракції при первинній обробці зерна висвітлені в роботі [1]. Реалізація способів покращення ефективності функціонування і якості сепарування у повітряних каналах наведена в останніх роботах [2-9]. Так в роботі в [2] для покращення поділу матеріалів в горизонтальному каналі запропоновано подачу зерна здійснювати через вертикальний повітряний канал. В роботі [3] подачу матеріалу у вертикальний канал реалізовано через багаторівневий каскад направляючих жолобів, що зменшує взаємодію між зернівками при вході в канал. В роботі [4] вперше реалізовано поділ КЗМ у нижній зоні вертикального пневмоканалу і доведено можливість фракціонування у вертикальному каналі з нижнім сходом зернівок. В роботі [5] для підвищення ефективності використано вертикальний пневмоканал з періодично змінною площею поперечного перетину за висотою. В роботах [6, 7] вперше визначена ефективність зміни швидкості потоку за висотою нахиленого пневмоканалу і регулювання середньої швидкості повітря в каналі. Але при математичному описі руху зернівки використано модель з рівномірним потоком. Разом з тим в роботі [8] використана модель руху зернівки у вертикальному каналі з розподіленою за логарифмічним законом швидкістю повітря і покладено зниження розходження траєкторій за рахунок нерівномірності поля швидкостей повітря. в роботах [9, 10] досліджено рух зернівок у вертикальному і горизонтальному каналах при зміні швидкості повітря в напрямку його руху та визначено збільшення ефективності поділу КЗМ.

Разом з тим у розглянутих роботах невраховано дію додаткових, так званих бокових (поперечних) сил, зумовлених нерівномірністю поля швидкостей повітряного потоку. Вплив дії бокових сил у вертикальному і горизонтальному пневмосепаруючому каналах висвітлено в роботах [11, 12, 13] та показано негативний вплив (зменшення

розходження траєкторій) дії бокових сил типу Магнуса і Жуковського. Разом з тим окремі дослідження проведено шляхом розрахунку траєкторій руху при довільних формах опису поля швидкостей повітряних потоків в каналах пневмосепараторів, показали, що можливість підвищення якості поділу при певній конфігурації епюри швидкості повітря. окремі дані цих досліджень опубліковано в роботі [13].

**Постановка завдання.** Сформулювати математичний опис переміщення КЗМ в пневмоканалах із штучно сформованим розподілом швидкості повітря в поперечному перетині каналу для підвищення якості поділу (розходження траєкторій) КЗМ.

**Методи і матеріали досліджень.** Оскільки особливості конструкцій технічних засобів для пневмосепарування не розглядаються, обрано аналітичний метод дослідження процесів фракціонування, шляхом побудови математичного опису для розрахунку траєкторій руху КЗМ і наступний їх аналіз.

**Виклад основного матеріалу.** Експериментальними і теоретичними дослідженнями процесів сепарування зерна в повітряних каналах [14, 15] виявлено, що ефективність поділу зернового матеріалу в значній мірі залежить від рівномірності повітряного потоку в каналі. Рівномірність потоку в повітряних каналах характеризується полем швидкості цього потоку, яке може бути описано напівемпіричними залежностями. Найбільш широко застосовують ступеневий закон розподілу у вигляді виразу [16]:

$$v(x) = v_{max} \cdot \left[ \frac{x}{b} \right]^{1/n}, \quad (1)$$

де  $v_{max}$  – змінна в часі швидкість повітря в центрі каналу;

$b$  – половина відстані між стінками каналу;

$x$  – відстань від розглядаємої точки до стінки каналу;

$n$  – коефіцієнт, який залежить від числа Рейнольдса  $Re$  [ $n=7-10$  при  $Re=2,3(10^3 \dots 10^5)$ ].

Або більш точну логарифмічну залежність А. Альтшуля [17]:

$$\frac{v(x)}{v_{max}} = \left( 1 - 2 \frac{\lg \left[ \frac{b}{x} \right]}{\sqrt{\lambda} + 1,35} \right), \quad (2)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт опору каналу.

Наявність градієнта швидкості повітря в каналах, зумовлює виникнення бокових сил [18] типу Жуковського (підйомна сила  $\vec{F}_ж$ ) і типу Магнуса (ефект Магнуса -  $\vec{F}_M$ ). Дія цих  $\vec{F}_ж$  і  $\vec{F}_M$  спрямовані нормально вектору відносної швидкості потоку обтікаючого зернівку  $\vec{u}$ . При цьому напрямок дії сили  $\vec{F}_ж$  спрямовано в бік збільшення значення швидкості повітря в перетині каналу (тобто до вісі каналу); вектор сили  $\vec{F}_M$  в напрямку того боку зернівки де вектор швидкості повітряного потоку  $\vec{V}_п(x)$  співпадає з напрямком обертання зернівки (з кутовою швидкістю  $\vec{\omega}$  [20]).

Таким чином, сила  $\vec{F}_ж$  відхиляє зернівку в процесі її руху до центральної частини каналу де швидкість повітря найбільша. Напрямок дії бокової сили  $\vec{F}_M$  залежить від напрямку обертання зернівки: якщо зернівка при сходженні із живильника починає обертатися за годинниковою стрілкою то вона буде відхилятися від осьової лінії до (правої) стінки, якщо напрям обертання протилежний, зернівка буде відхилятися від стінки (правої) до вісі каналу. При відсутності градієнту швидкості повітря або обертання зернівки бокові сили на неї не діють, тобто  $\vec{F}_M = \vec{F}_ж = 0$ . Тому вирівненість швидкості повітряного потоку сприяє підвищенню ефективності поділу КЗМ.

Але, в зв'язку з тим, що центр тиску повітряного потоку не співпадає з центром тяжіння, на зернівку діє момент аеродинамічної сили і вона обертається в потоці в

процесі переміщення. Зернівка відрізняється від форми кулі, тому при повороті змінює площу міделевого перетину, а відповідно і силу опору, в наслідок чого з'являються компоненти реакції повітряного потоку в горизонтальній площині і траєкторія її руху стає просторовою кривою [19].

За умови рівномірного поля швидкостей повітряного потоку подальше збільшення якості розділення КЗМ досягається зміною швидкості повітря в каналах в напрямку його руху, що висвітлено в роботах [8, 9].

Оскільки дія і напрямок бокових сил певною мірою залежать від форми кривої розподілу швидкості повітря і, відповідно, модуля та вектора градієнта швидкості, то величину і напрям дії цих сил можна спрямувати на підвищення якості розділення КЗМ шляхом штучного формування необхідного поля швидкостей повітря в каналах.

Розглянемо процес руху КЗМ в нерівномірних повітряних потоках при заздалегідь заданих формах епюри швидкостей повітря в площині Декартової прямокутної системи координат ХОУ при загальноприйнятих спрощуючих припущень [10-13].

Використовуючи модель силової взаємодії КЗМ з нерівномірним стаціонарним повітряним потоком, запишемо диференціальні рівняння руху зернівки у векторній формі:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{R} + \vec{G} + \vec{F}_M(\omega) + \vec{F}_J, \quad (3)$$

$$I \frac{d\omega}{dt} = M, \quad (4)$$

де  $\vec{G} = mg$  – сила тяжіння;

$\vec{R} = -m \cdot k_V \cdot \vec{u}^2(t)$  – сила аеродинамічного опору;

$\vec{F}_J = \frac{4}{3} \pi \rho r^2 \text{grad } V(x) \vec{u}$  – сила Жуковського;

$\vec{F}_M(\omega) = \frac{16}{3} \pi \rho r^3 \cdot \omega \cdot \vec{u}$  – сила Магнуса;

$\vec{u} = \vec{V}_\Pi(x) - \vec{V}$  – відносна швидкість (швидкість обтікання);

$I$  – момент інерції;

$m = \frac{\pi d_e^3}{6} \rho_3$  – маса зернівки;

$d_e = 2r$  – еквівалентний діаметр зернівки;

$\rho, \rho_3$  – густина повітря і речовини зернівки, відповідно;

$\vec{V}$  – швидкість зернівки;

$\vec{V}_\Pi(x)$  – швидкість повітря (розподілена).

Проектуючи рівняння (3) на вісі ХОУ матимемо систему диференціальних рівнянь руху зернівки в координатній формі:

$$\begin{cases} m \frac{dV_x}{dt} = -R \sin \beta \pm F_{M(x)} \cos \beta \pm F_{J(x)} \cos \beta, \\ m \frac{dV_y}{dt} = mg - R \cos \beta \pm F_{M(y)} \sin \beta \pm F_{J(y)} \sin \beta, \end{cases} \quad (5)$$

де  $V_x = \frac{dx}{dt}$ ;  $V_y = \frac{dy}{dt}$ ;  $\sin \beta = \frac{V_x \pm V_\Pi(x)}{u}$ ,  $\cos \beta = \frac{V_y \pm V_\Pi(x)}{u}$ ;

$$u = \sqrt{(V_x \pm V_\Pi(x))^2 + (V_y \pm V_\Pi(x))^2};$$

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

$\beta$  – кут між вектором абсолютної швидкості і віссю ОХ.

Рівняння системи (5) записані в загальному вигляді при наявності двох потоків повітря  $V_\Pi$ , кожен з яких (горизонтальний або вертикальний) може бути використано окремо.

Розглянемо процес руху КЗМ в горизонтальному каналі найпростішого сепаратора типу «віялка» рис.1.

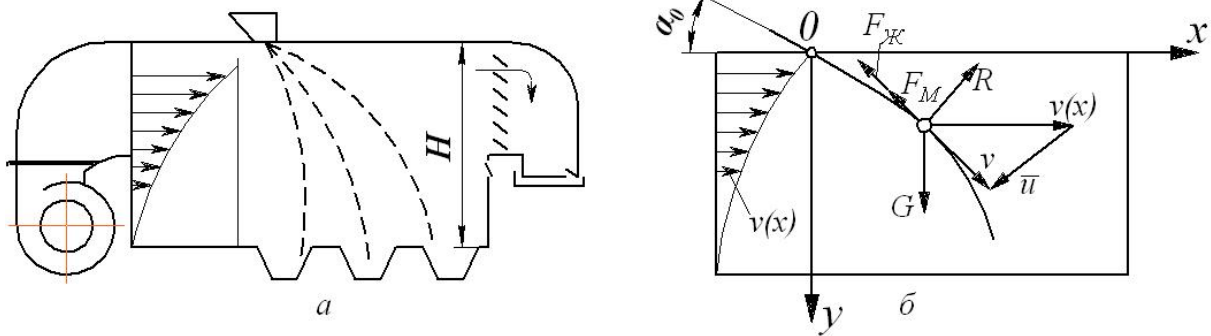


Рисунок 1 – Схема сепаратора (а) та силової взаємодії зернівки з нерівномірним повітряним потоком (б)

Джерело: розроблено авторами з використанням [13, 21, 24]

Не вдаючись до деталей технічних можливостей формування епюри швидкостей повітря в горизонтальному каналі, прийmemo експоненціальну залежність зміни швидкості повітря за висотою каналу:

$$V(y) = v_{max} e^{-ky}, \quad (6)$$

яка наближено характеризує розподіл швидкості повітря на виході з відцентрового вентилятора.

Гradient швидкості повітря матиме протилежний знак порівняно із степеневим розподілом (1), а саме:

$$\text{grad } V(x) = -k v_{max1} e^{-ky}, \quad (7)$$

де  $v_{max1}$  – швидкість повітря в зоні верхньої стінки каналу.

В цьому випадку сили  $\bar{F}_M$  і  $\bar{F}_Ж$  з умовно заданим напрямком обертання, спрямовані в бік протидії рухові зернівки, що має збільшити час її перебування в камері (каналі) поділу.

Проекції  $\bar{F}_M$  і  $\bar{F}_Ж$  на вісі координат визначаються наступними залежностями:

$$F_{Ж(x)} = -\frac{4}{3} \pi \rho r^3 k v_{max1} e^{-ky} \left[ v_{max1} e^{-ky} - \frac{dx}{dt} \right], \quad (8)$$

$$F_{M(x)} = -\frac{8}{3} \pi \rho r^3 \cdot \omega(t) \cdot \left[ v_{max1} e^{-ky} - \frac{dx}{dt} \right], \quad (9)$$

$$F_{Ж(y)} = \frac{4}{3} \pi \rho r^3 k v_{max1} e^{-ky} \left[ \frac{dy}{dt} \right], \quad (10)$$

$$F_{M(y)} = -\frac{8}{3} \pi \rho r^3 \cdot \omega(t) \cdot \left[ \frac{dy}{dt} \right]. \quad (11)$$

Підставляючи значення визначених складових в рівняння (5) отримаємо:

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} = k_v \left[ v(y) - \frac{dx(t)}{dt} \right] \sqrt{\left[ v(y) - \frac{dx(t)}{dt} \right]^2 + \left( \frac{dy(t)}{dt} \right)^2} - \frac{[F_{Ж(x)} + F_{M(\omega)x}]}{m} \cdot \frac{\frac{dy(t)}{dt}}{\sqrt{\left[ v(y) - \frac{dx(t)}{dt} \right]^2 + \left( \frac{dy(t)}{dt} \right)^2}}, \quad (12)$$

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} = g - k_v \left( \frac{dy(t)}{dt} \right) \sqrt{\left[ v(y) - \frac{dx(t)}{dt} \right]^2 + \left( \frac{dy(t)}{dt} \right)^2} - \frac{[F_{ж(x)} + F_{м(\omega)x}]}{m} \cdot \frac{v(y) - \frac{dx(t)}{dt}}{\sqrt{\left[ v(y) - \frac{dx(t)}{dt} \right]^2 + \left( \frac{dy(t)}{dt} \right)^2}}, \quad (13)$$

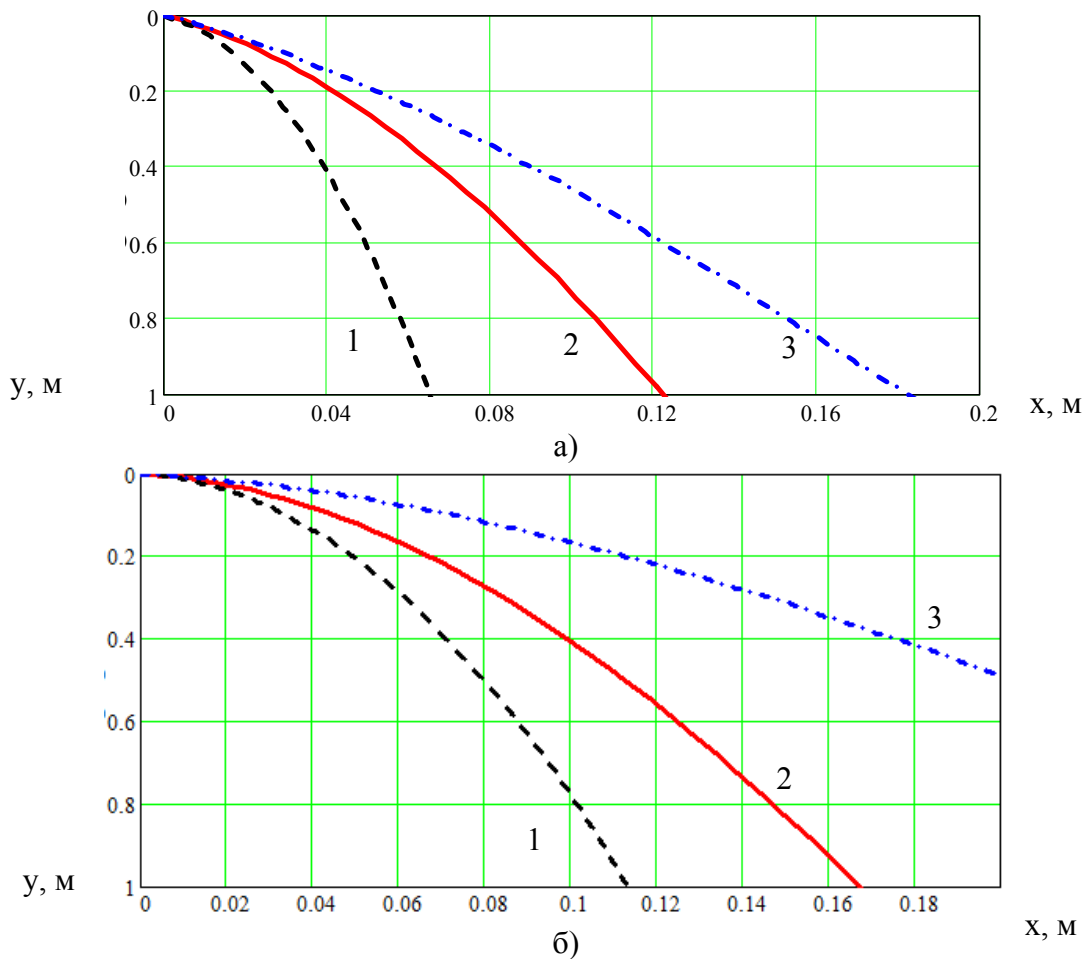
Для замикання системи визначимо залежність  $\omega(t)$ :

$$I \frac{d\omega(t)}{dt} = 2,3\pi\rho r^3 \frac{h-y}{h-r} \left( \vartheta_{\max} b^{-ky} - \frac{dx(t)}{dt} \right), \quad (14)$$

та запишемо початкові умови:

$$t = 0; x = 0; y = 0; \frac{dx(t)}{dt} = V_0 \cos \alpha_0; \frac{dy(t)}{dt} = V_0 \sin \alpha_0; \omega = \omega_0, \quad (15)$$

Розв'язок системи рівнянь (12) – (14) за початкових умов (15) отримано числено в комп'ютерному середовищі MathCad у вигляді траєкторії руху зернівки з різними значеннями швидкості витання і відповідно маси (рис. 2).



1 – 3 відповідно  $k_v = 0.139; 0.184; 0.392$

Рисунок 2 – Траєкторія руху зернівки в горизонтальному каналі з рівномірним (а) та експоненціальним розподілом швидкості повітря за висотою каналу(б)

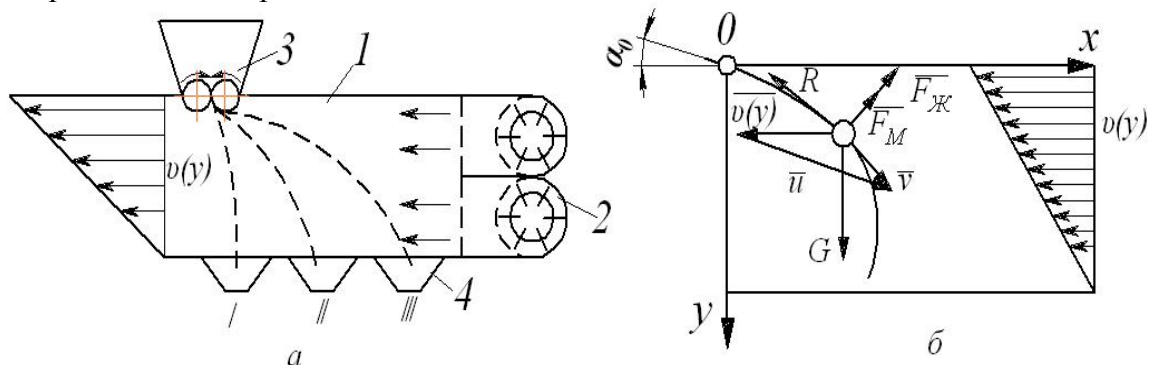
Джерело: розроблено авторами

Порівнюючи отримані залежності  $y(x)$  можна зазначити, що зміною епюри швидкості повітря в каналі можна збільшити розходження траєкторій і відповідно ефективність поділу зернового матеріалу на фракції.

Перспективним напрямком підвищення якості розділення зернового матеріалу на фракції у горизонтальному потоці є використання інерційних сил при русі зерна проти напрямку повітряного потоку. В цьому випадку збільшується швидкість обтікання зернівок повітрям при вході в канал і, відповідно сила опору.

Збільшення швидкості повітря в зоні входу зерна в канал шляхом зміни епюри швидкості повітря збільшує як сили опору  $R$  так і сили  $\bar{F}_Ж$  і  $\bar{F}_М$ , які будуть діяти, як «підйомні».

Схему пневмоінерційного сепаратора та силової взаємодії зернівки з потоком повітря наведено на рис. 3.



1 – пневмоканал, 2 – вентилятори, 3 – живильні вальці, 4 – збірники фракцій

Рисунок 3 – Схема пневмоінерційного сепаратора (а) і силової взаємодії зернівки з повітряним потоком (б)

Джерело: розроблено авторами з використанням [13, 21, 24]

Прийmemo лінійний розподіл швидкості повітряного потоку за висотою каналу:

$$v(y) = v_{max} - by(t) \quad (16)$$

Система диференціальних рівнянь руху зернівки в горизонтальному нерівномірному потоці з протитечівою подачею матеріалу в координатній формі матиме вигляд:

$$\begin{cases} m \frac{d^2x(t)}{dt^2} = -R \frac{\frac{dx(t)}{dt} + v(y)}{U} + F_{Ж(x)} \frac{dy(t)}{U} + F_{М(x)} \frac{dy(t)}{U}, \\ m \frac{d^2y(t)}{dt^2} = mg - R \frac{dy(t)}{U} - F_{Ж(y)} \frac{\frac{dx(t)}{dt} - v(y)}{U} - F_{М(y)} \frac{\frac{dx(t)}{dt} - v(y)}{U} \end{cases} \quad (17)$$

$$\text{де } U = \sqrt{\left[\frac{dx(t)}{dt} + v(y)\right]^2 + \left(\frac{dx(t)}{dt}\right)^2}; \quad R = k_v m U^2.$$

Проекції сил  $F_{Ж(x,y)}$  та  $F_{М(x,y)}$  на вісі прямокутної системи координат  $XOY$  можна записати у вигляді:

$$F_{Ж(x)} = \frac{-4}{3} \pi \rho r^3 \cdot b \left( v_{max} - by - \frac{dx}{dt} \right), \quad (18)$$

$$F_{М(x)} = \frac{8}{3} \pi \rho r^3 \cdot \omega \cdot \left( v_{max} - by - \frac{dx}{dt} \right), \quad (19)$$

$$F_{Ж(y)} = -\frac{4}{3} \pi \rho r^3 \cdot b \frac{dy}{dt}, \quad (20)$$

$$F_{М(y)} = \frac{8}{3} \pi \rho r^3 \cdot \omega \cdot \frac{dy}{dt}. \quad (21)$$

Підставляючи значення діючих сил в рівнянні (17) остаточно отримаємо:

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} = - \frac{k_v \left( \frac{dx(t)}{dt} + v(y) \right)}{\sqrt{\left( \frac{dx(t)}{dt} + v(y) \right)^2 + \left( \frac{dy(t)}{dt} \right)^2}} +$$

$$+ \frac{\rho}{\rho_r} \left( v_{max} - by + \frac{dx}{dt} \right) (b + 2\omega) \frac{\frac{dy(t)}{dt}}{\sqrt{\left( \frac{dx(t)}{dt} + v(y) \right)^2 + \left( \frac{dy(t)}{dt} \right)^2}}, \quad (22)$$

$$\frac{d^2y(t)}{dt^2} = g - \frac{k_v \frac{dy(t)}{dt}}{\sqrt{\left( \frac{dx(t)}{dt} + v(y) \right)^2 + \left( \frac{dy(t)}{dt} \right)^2}} -$$

$$- \frac{\rho}{\rho_r} \frac{dy}{dt} (b + 2\omega) \frac{\frac{dx(t)}{dt} + v(y)}{\sqrt{\left( \frac{dx(t)}{dt} + v(y) \right)^2 + \left( \frac{dy(t)}{dt} \right)^2}}. \quad (23)$$

Для замикання системи (22) – (23) необхідно мати залежність  $\omega = \omega(t)$ . При наявності початкової швидкості обертання зернівки  $\omega_0$  (яку забезпечують вальці живильного пристрою (поз. 3 рис. 3а), що обертаються з різною швидкістю.

Зміну кутової швидкості обертання зернівки можна визначити з рівняння [13]:

$$\frac{d\omega(t)}{dt} = 15 \frac{\mu}{\rho r^2} \omega(t), \quad (24)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості повітря.

За умови  $t = 0$ ;  $\omega = \omega_0$ , зміна швидкості обертання в часі визначається залежністю:

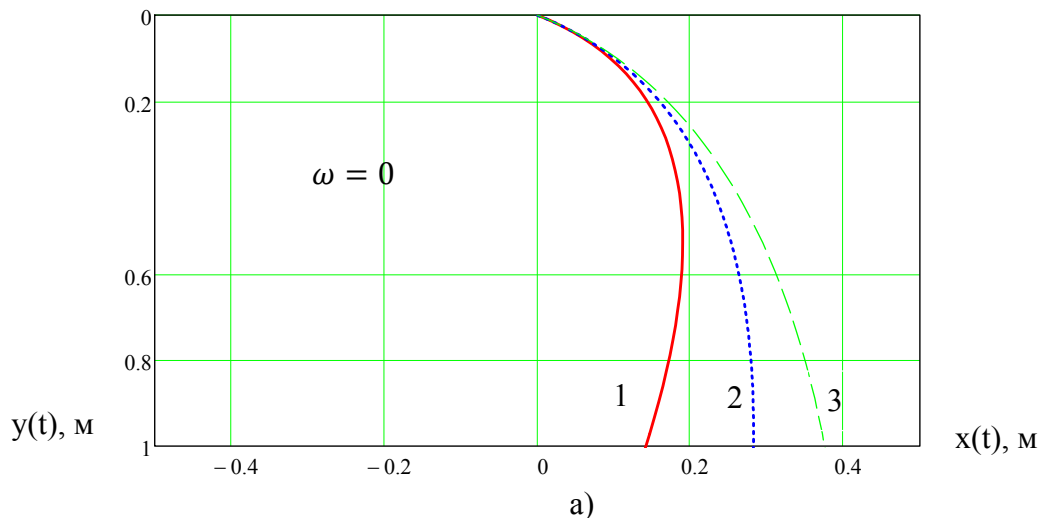
$$\omega(t) = \omega_0 e^{-15 \frac{\mu t}{\rho r^2}}. \quad (25)$$

Для розв'язку системи рівнянь сформульовано початкові умови:

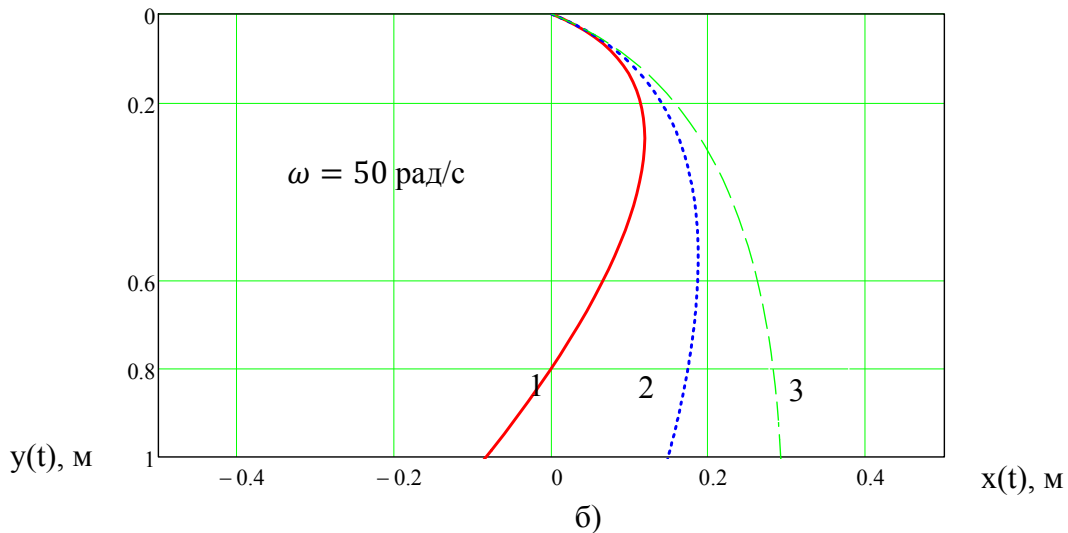
$$t = 0; x = 0; y = 0; \frac{dx(t)}{dt} = V_0 \cos \alpha_0; \frac{dy(t)}{dt} = V_0 \sin \alpha_0; \omega = \omega_0, \quad (26)$$

$V_0$  – швидкість введення зернового матеріалу в пневмосепаруючий канал.

Розв'язок системи рівнянь (22) – (24) з початковими умовами (26) виконано в комп'ютерному середовищі MathCad. Результати представлено у вигляді траєкторії руху окремих компонентів зернового матеріалу на рис. 4.







1 – 3 – відповідно  $k_V = 0,139; 0,184; 0,392$

Рисунок 4 – Траєкторії руху зернівок з різними значеннями коефіцієнтами парусності

Джерело: розроблено авторами

Основними недоліками вертикальних пневмосепаруючих каналів традиційної прямокутної форми перетину крім суттєвої об'ємної нерівномірності швидкості повітряного потоку, наявності застійних кутових зон є недосконалість системи подачі зерна в канал (похилі або вигнуті скатні дошки, багаторівневе введення), які не забезпечують: рівномірного розподілу зерна за шириною каналу; розшарування і розділення зернового потоку, що в свою чергу призводить до струменевого введення зернового матеріалу в потік повітря.

В результаті багатократного зіштовхування зернин, залучення дрібних фракцій в сліди руху крупніших компонентів. В результаті частина основних фракцій виноситься, частина сміттєвих домішок потрапляє в сідло товарних фракцій.

Застосування циліндричних пневмоканалів з кільцевим перетином дозволяє значно покращити процес розділення КЗМ на фракції. Застосування «об'ємних» живильників (конічної форми або у вигляді поверхонь обертання з криволінійною твірною) забезпечує рівномірне по периметру каналу, введення зерна (практично моношаром) в повітряний потік, а також виключає застійні зони в каналі.

Разом з тим, слід відмітити, що нерівномірність поля швидкостей повітряного потоку в кільцевому каналі, негативно впливає на ефективність розділення зернового матеріалу.

Не вдаючись до деталей технічної реалізації зміни епюри швидкості повітряного потоку в кільцевому каналі розглянемо рух зернівок в потоці повітря із штучно сформованою нерівномірністю швидкості повітря. Схеми пневмосепаруючого каналу та силової взаємодії зернівки з потоком повітря наведено на рис. 5а і рис. 5б відповідно. Вісь ОУ умовно поділяє повітряний об'єм каналу на дві частини (вздовж вісі) в яких середня за об'ємними витратами повітря швидкість однакова.

В першій частині розподіл швидкості повітря описується степеневим законом:

$$v(x) = v_{max} \cdot \left[ \frac{x}{b} \right]^{1/10}, \quad (26)$$

а в другій частині розподіл швидкості повітря описується експоненціальним законом:

$$v(x) = v_{max} e^{k_V y}. \quad (27)$$

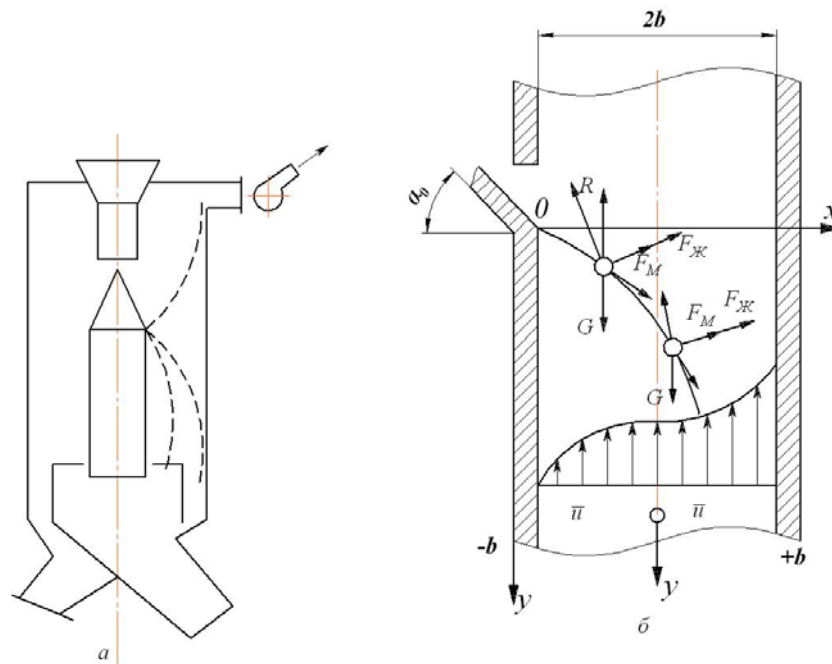


Рисунок 5 – Схема пневмогравітаційного сепаратора (а) та силової взаємодії зернівки з потоком повітря (б)

Джерело: розроблено авторами

На зернівку в повітряному каналі крім сили тяжіння  $\bar{G} = mg$ , та аеродинамічного опору  $\bar{R} = m \cdot k_V \cdot \bar{u}^2(t) = m \cdot k_V \cdot (V_{\Pi}(x) - \vartheta(x))^2$ , діють бокові (відхиляючі) сили  $\bar{F}_M$  і  $\bar{F}_J$ .

Рівняння динаміки руху зернівки у вертикальному нерівномірному потоці в координатній формі матимуть вигляд:

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} = -k_V(V_{\Pi}(x) - \vartheta(x))^2 \cos \alpha + \frac{F_{M(x)} + F_{J(x)}}{m} \sin \alpha, \quad (28)$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = g \sin \alpha + k_V(V_{\Pi}(y) - \vartheta(y))^2 \sin \alpha + \frac{F_{M(y)} + F_{J(y)}}{m} \cos \alpha. \quad (29)$$

З аналізу взаємодії сил діючих на зернівку та рівнянь руху (28) і (29) випливає, що бокові сили  $\bar{F}_M$  і  $\bar{F}_J$  відхиляють зернівки різної маси і парусності в один бік на протязі всього часу руху в каналі. Причому, як можна бачити, з рівнянь, менш масові бокові сили мають більший вплив на зернівки меншої маси і менший вплив на зернівки більшої маси, що сприяє розходженню траєкторій руху зернівок різних фракцій.

Проекції сил діючих на зернівку визначаються за аналогією з попереднім дослідженням у наступному вигляді:

- В межах каналу (-b...0):

$$F_{J(x)1} = \frac{4}{3} \pi \rho r^3 \frac{\vartheta_{max1}}{10b^{0,1}x^{0,9}} \left[ \frac{dx}{dt} \right]$$

$$F_{M(x)1} = \frac{8}{3} \pi \rho r^3 \cdot \omega(t) \cdot \left[ \frac{dx}{dt} \right]$$

$$F_{J(y)1} = \frac{4}{3} \pi \rho r^3 \frac{\vartheta_{max1}}{10b^{0,1}x^{0,9}} \left[ \vartheta_{max1} \left[ \frac{x}{b} \right]^{0,1} - \frac{dy}{dt} \right] \quad (30)$$

$$F_{M(y)1} = \frac{8}{3} \pi \rho r^3 \cdot \omega(t) \cdot \left[ \vartheta_{max1} \left[ \frac{x}{b} \right]^{0,1} - \frac{dy}{dt} \right]$$

- В межах каналу (0...+b):

$$F_{J(x)2} = \frac{4}{3} \pi \rho r^3 k_V \vartheta_{max1} e^{kx} \left[ \frac{dx}{dt} \right],$$

$$\begin{aligned}
 F_{M(x)2} &= \frac{8}{3} \pi \rho r^3 \cdot \omega(t) \cdot \left[ \frac{dx}{dt} \right], \\
 F_{ж(y)2} &= \frac{4}{3} \pi \rho r^3 k_V \vartheta_{max1} e^{k_V y} \left[ \vartheta_{max1} e^{k_V y} - \frac{dy}{dt} \right], \\
 F_{M(y)2} &= \frac{8}{3} \pi \rho r^3 \cdot \omega(t) \cdot \left[ \vartheta_{max1} e^{k_V y} - \frac{dy}{dt} \right].
 \end{aligned}
 \tag{31}$$

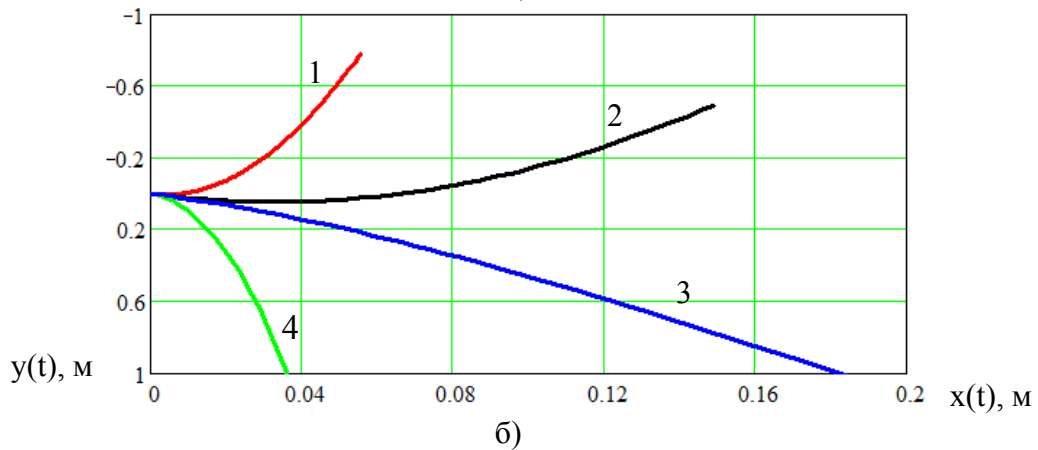
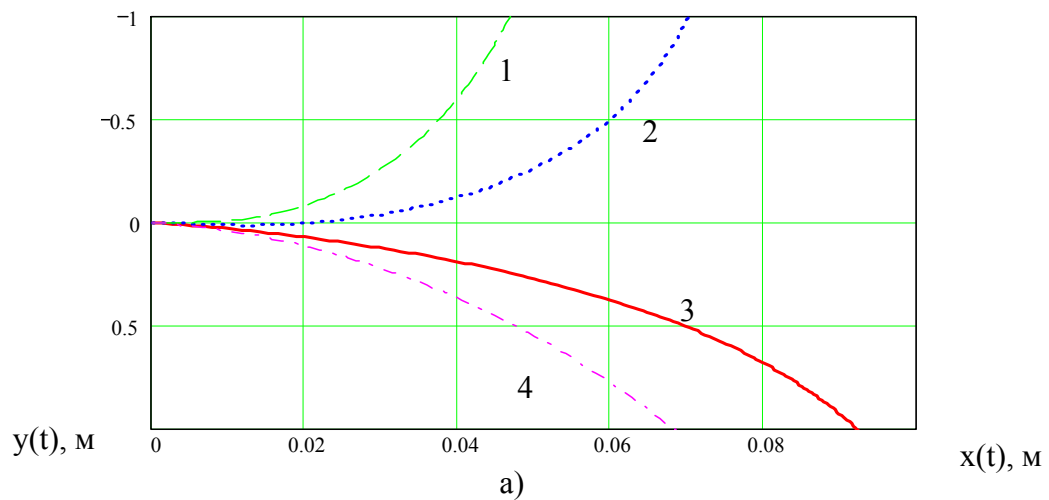
Початкові умови:

$$t = 0; x = -b; y = 0; \frac{dx}{dt} = \vartheta_0 \cos \alpha_0; \frac{dy}{dt} = \vartheta_0 \sin \alpha_0;
 \tag{32}$$

Граничні умови:

$$\begin{aligned}
 &\text{при } x < 0; F_{ж}, F_M = F_{ж1}, F_{M1}; \\
 &\text{при } x > 0; F_{ж}, F_M = F_{ж2}, F_{M2};
 \end{aligned}
 \tag{33}$$

Розв'язок рівнянь (28)-(29) з урахуванням (30)-(31) за початкових умов (32) і граничних умов (33) отримано в комп'ютерному середовищі MathCad у вигляді траєкторій руху зернівок у рівномірному повітряному потоці рис. 6а і штучно сформованому рис. 6б.



1 – 4 відповідно  $k_V = 0,4; 0,27; 0,159; 0,08$

Рисунок 6 – Траєкторії руху зернівок в рівномірному повітряному потоці (а) та при штучно сформованому полі швидкості (б)

Джерело: розроблено авторами

Як можна визначити із отриманих графічних залежностей, величина розходження траєкторій може бути суттєво збільшена при використанні раціональної конфігурації епюри швидкостей у поперечному перетині каналу.

Подальше збільшення ефективності поділу зернівок за аеродинамічними властивостями може бути досягнуто шляхом розподілу швидкості повітряного потоку за висотою каналу, а саме – збільшенням швидкості повітря в напрямку його руху. Так, наприклад, при зміні швидкості повітря (середньої за об’ємними витратами) за лінійним законом:

$$v_{max} = a - by, \quad (34)$$

де  $a = 12$ ;  $b = 1,8$ .

Суттєво змінюється форма траєкторій і величина їх розходження, тобто ефективність поділу КЗМ.

На рис. 6 наведені траєкторії руху зернівок чотирьох фракцій зернового матеріалу при різних параметрах епюри швидкості повітря у вертикальному перетині каналу, які свідчать про реальну можливість поділу зернового матеріалу на фракції у пневмогравітаційному сепараторі.

Розглянемо також процес поділу зернового матеріалу на фракції в нахиленому пневмосепаруючому каналі, описаного в роботах [19-24]. За технологічними ознаками при вертикальному завантаженні, нахилений канал функціонує в протитечієвому режимі і його можна розглядати, як пневмоінерційний сепаратор рис.7 в якому нахилений канал розташовано під кутом  $\alpha$  до горизонту з плоско-паралельними стінками. Швидкість повітря за висотою каналу розподілена за експоненціальним законом і визначається залежністю (6).

Використовуючи модель квазігоризонтального каналу [11, 13], коли рух зернівки розглядається в повернутій на кут  $\alpha$  прямокутній системі координат XOY.

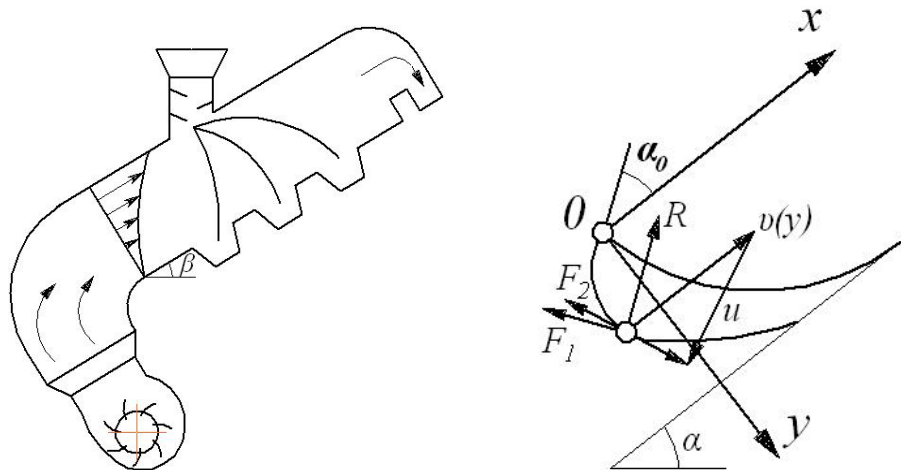


Рисунок 7 – Схема нахиленого пневмосепаруючого каналу (а) і розрахункова схема дії сил (б)  
Джерело: розроблено авторами

В цьому випадку використовуємо систему диференціальних рівнянь (5) в такому вигляді:

$$\begin{cases} m \frac{dV_x}{dt} = R \sin \alpha - [F_{M(x)} + F_{ж(x)}] \cos \alpha - mg \sin \alpha, \\ m \frac{dV_y}{dt} = mg \cos \alpha - R \cos \alpha - [F_{M(y)} + F_{ж(y)}] \sin \alpha, \end{cases} \quad (35)$$

$$\text{де } \sin \alpha = \frac{dy}{u}, \quad \cos \alpha = \frac{dy + dx}{u}, \quad u = \sqrt{\left(\frac{dy}{dt} + \frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2};$$

Бокові сили визначаються з рівнянь (8)-(11) при заміні в (10) і (11) знаку перед похідною  $\frac{dx}{dt}$  на протилежний.

### Висновки:

1. Теоретично досліджено та встановлено закономірності руху зернівки у вигляді математичних моделей динаміки руху твердої зернівки в потоці повітря, які відрізняється від відомих тим, що враховують дію бокових сил, концентрацію матеріалу, а застосування степеневого та штучно сформованого експоненціального закону розподілу повітря дало можливість підвищити розходження (розщеплення) траєкторій руху зернівок на 20%.

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

### Список літератури

1. Степаненко С. П., Котов Б. І. Основні концептуальні положення пневматичного фракціонування зернових матеріалів. *Механізація та електрифікація сільського господарства : загальнодерж. зб. Глевах.* 2018. Вип. № 8 (107). С. 80–88.
2. Єрмак В. П. Обґрунтування способу сепарування насіння соняшника у повітряних потоках : дис. ... канд. техн. наук. Луганськ. 2003. 166 с.
3. Нестеренко О. В. Обґрунтування параметрів пневмосепаруючого каналу з багаторівневим введенням зернового матеріалу : автореф. дис. ... канд. техн. наук / ЦНТУ. Кропивницький, 2017. 21 с.
4. Колодій О. С. Обґрунтування конструктивно-технологічних параметрів пневмогравітаційного сепаратора насіння соняшника : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11. Мелітополь, 2015. 23 с.
5. Степаненко С. П. Дослідження процесу пневматичної сепарації насіння в кільцевому зигзагоподібному сепараторі. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. Петра Василенка* : зб. наук. пр. Серія : Механізація сільськогосподарського виробництва. 2008. Вип. 75. Т 1. С. 59-65.
6. Абдуєв М. М. Обґрунтування параметрів сепаратора з нахиленим повітряним каналом для розділення зернових сумішей : автореф. дис...канд. техн. наук / ХНТУСГ ім. П. Василенка. Харків, 2007. 20 с.
7. Крекот М. М. Обґрунтування параметрів процесу і розробка пневматичного сепаратора насіння овочевих культур : автореф. дис. ...канд. техн. наук / ХНТУСГ ім. П. Василенка. Харків, 2015. 20с.
8. До питання пневмогравітаційної сепарації зернових матеріалів / Котов Б. І. та ін. *Процеси та обладнання переробних та харчових виробництв*. 2017. Вип. 4(99). С.51-55.
9. Котов Б. І., Степаненко С. П. Закономірності руху частинок в пневмогравітаційному сепараторі при змінній швидкості горизонтального повітряного потоку. *Сільськогосподарські машини : зб. наук. статей / Луцький нац. техн. ун - т. Луцьк, 2016. Вип. 35. С.40-45.*
10. Степаненко С. П., Котов Б. І. Дослідження закономірностей руху компонентів зернового матеріалу під час пневмогравітаційного фракціонування у вертикальному каналі. *Механізація та електрифікація сільського господарства : загальнодерж. зб.* 2018. Вип. №7 (106). С.82-89.
11. 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. міжвід. наук.-техн. зб.* 2020. Вип. 50. С. 122–133.
12. Котов Б. І., Степаненко С. П. Математичне моделювання процесів поділу компонентів зернового матеріалу в комбінованому вібраційно-повітряному сепараторі. *Вібрації в техніці та технологіях : Всеукр. наук.-техн. журнал.* 2020. Вип. № 2 (97). С. 51–61.
13. Степаненко С. П. Механіко-технологічне обґрунтування процесів і обладнання безрешітного фракціонування зернових матеріалів: автореф. дис...д-ра. техн. наук: 05.05.11 . Глевах, 2021. 50 с.
14. Гортинский В. В., Демский А. Б., Борискин М. А. Вопросы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях. М.: Колос, 1980. 304 с.
15. Малис А. Я., Демидов А. Р. Машины для очистки зерна воздушным потоком. М.: Машгиз, 1962. 176 с.
16. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.-Л.: Гос. изд. Техничко-теор. лит., 1950. 676 с.

17. Барский М. Д. Фракционирование порошков. М., 1980. 327 с.
18. Зуев Ф. Г. Пневматическое транспортирование на зерноперерабатывающих предприятиях. М.: Колос, 1979. 344 с.
19. Нелюбов А. И., Ветров Е. Ф. Пневмосепарирующие системы сельскохозяйственных машин. М.: Машиностроение. 1977. 192 с.
20. Ольшанский В. П., Ольшанский С. В. О траектории полета вращающейся сферической частицы. *Вісник ХНТУСГ*. Харків, 2009. Вип. 88. С. 54 – 61.
21. Степаненко С. П., Котов Б. І. Основні концептуальні положення пневматичного фракціонування зернових матеріалів. *Механізація та електрифікація сільського господарства : загальнодерж. зб.* 2018. Вип. № 8 (107). С. 80–88.
22. Stepanenko S. Experimental study in a pneumatic microbiscature separator with apparatus camera / S. Stepanenko, Rogovskii, I., Titova, L., Trokhaniak, V., Trokhaniak, O. // In: Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering, vol. 12 (61), No. 1 . 2019. pp. 117-128.
23. Stepanenko S.P. Experimental studies on drying conditions of grain crops with high moisture content in low-pressure environment / Stepanenko S.P, Rogovskii I.L., Titova L.L., Trokhaniak V.I., Solomka O.V., Popuk P.S., Shvidia V.O. // *INMATEH - Agricultural Engineering* . Jan-Mar 2019, Vol. 57, Issue 1, p. 141-146.
24. Моделювання технологічних процесів в типових об'єктах післязбиральної обробки і зберігання зерна (сепарація, сушіння, активне вентилявання, охолодження): монографія / Б. І. Котов та ін. Ніжин: Видавець ПП Лисенко М. М., 2017. 552 с.

## Referencis

1. Stepanenko, S.P. & Kotov, B.I. (2018). Osnovni kontseptual'ni polozhennia pnevmatichnoho fraktsionuvannia zernovykh materialiv [Basic conceptual provisions of pneumatic fractionation of grain materials]. *Mekhanizatsiia ta elektrifikatsiia sil's'koho hospodarstva : zahal'nodерж. zb. Hlevakha – Mechanization and electrification of agriculture: nationwide. zb. Glevakha, Vol. 8 (107)*, 80–88 [in Ukrainian].
2. Yermak V. P. (2003). Obgruntuvannia sposobu separuvannia nasinnia soniashnyka u povitrianykh potokakh [Substantiation of the method of separation of sunflower seeds in air streams]. *Candidate's thesis*. Science. Luhans'k [in Ukrainian].
3. Nesterenko, O.V. (2017). Obgruntuvannia parametriv pnevmoseparuiuchoho kanalu z bahatorivnevym vvedenniam zernovoho materialu [Substantiation of parameters of the pneumatic separating channel with multilevel introduction of grain material]. *Extended abstract of candidate's thesis*. TsNTU. Kropyvnyts'kyj [in Ukrainian].
4. Kolodij O. S. (2015). Obgruntuvannia konstruktyvno-tekhnologichnykh parametriv pnevmohravitatsijnogo separatora nasinnia soniashnyka [Substantiation of constructive-technological parameters of pneumogravity separator of sunflower seeds]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Melitopol' [in Ukrainian].
5. Stepanenko, S. P. (2008). Doslidzhennia protsesu pnevmatichnoi separatsii nasinnia v kil'tsevomu zyhzhapodibnomu separatori [Research of the process of pneumatic separation of seeds in a ring zigzag separator]. *Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil's'koho hospodarstva im. Petra Vasylenka : zb. nauk. pr. Serii : Mekhanizatsiia sil's'kohospodars'koho vyrobnytstva – Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture. Petra Vasylenko: coll. Science. etc. Series: Mechanization of agricultural production, Vol. 75, 1*, 59-65. [in Ukrainian].
6. Abduiev, M. M. (2007). Obgruntuvannia parametriv separatora z nakhylenym povitrianykh kanalom dlia rozdilennia zernovykh sumishej [Substantiation of parameters of the separator with the inclined air channel for separation of grain mixes]. *Extended abstract of candidate's thesis*. KhNTUSH im. P. Vasylenka. Kharkiv [in Ukrainian].
7. Krekot, M. M. (2015). Obgruntuvannia parametriv protsesu i rozrobka pnevmatichnoho separatora nasinnia ovochevykh kul'tur [Substantiation of process parameters and development of a pneumatic separator of vegetable seeds]. *Extended abstract of candidate's thesis*. KhNTUSH im. P. Vasylenka. Kharkiv [in Ukrainian].
8. Kotov, B. I., Spirin, A. V., Tverdokhlib, I. V., Stepanenko, S. P. & Shvydia, V.O. (2017). Do pyttannia pnevmohravitatsijnoi separatsii zernovykh materialiv [On the issue of pneumogravity separation of grain materials]. *Protsesy ta obladnannia pererobnykh ta kharchovykh vyrobnytstv – Processes and equipment of processing and food production* , Issue 4 (99), 51-55. [in Ukrainian].

9. Kotov B. I. & Stepanenko, S. P. (2016). Zakonomirnosti rukhu chastynok v pnevmohravitatsijnomu separatori pry zminnij shvydkosti horyzontal'noho povitrianoho potoku [Regularities of particle motion in a pneumogravity separator at a variable speed of horizontal air flow]. *Sil's'kohospodars'ki mashyny : zb. nauk. statej – Agricultural machinery: Coll. Science. articles , Luts'kyj nats. tekhn. un - t. Luts'k, Issue 35*, 40-45. [in Ukrainian].
10. Stepanenko, S. P. & Kotov, B. I. (2018). Doslidzhennia zakonomirnostej rukhu komponentiv zernovoho materialu pid chas pnevmohravitatsijnoho fraktsionuvannia u vertykal'nomu kanali [Investigation of patterns of motion of grain material components during pneumogravity fractionation in the vertical channel.]. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia sil's'koho hospodarstva : zahal'noderzh. zb. – Mechanization and electrification of agriculture: a national collection, Issue 7 (106)*, 82-89. [in Ukrainian].
11. Kotov, B. I. & Stepanenko, S. P. (2020). Osnovni teoretychni polozhennia separatsii zernovoho materialu v povitrianykh kanalakh z nerivnomirnoiu shvydkistiu povitrianoho potoku [The main theoretical provisions of the separation of grain material in air ducts with uneven air flow rate.]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia sil's'kohospodars'kykh mashyn : zahal'noderzh. mizhvid. nauk.-tekhn. zb – Design, manufacture and operation of agricultural machinery: nationwide. interdepartmental scientific and technical zb., Issue. 50*, 122–133. [in Ukrainian].
12. Kotov, B. I. & Stepanenko, S. P. (2020). Matematychni modeliuvannia protsesiv podilu komponentiv zernovoho materialu v kombinovanomu vibratsijno-povitrianoomu separatori [Mathematical modeling of processes of separation of grain material components in the combined vibration-air separator]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh : Vseukr. nauk.-tekhn. zhurnal – Vibrations in engineering and technologies: All-Ukrainian scientific and technical journal , Vol. 2 (97)*, 51–61. [in Ukrainian].
13. Stepanenko S. P. (2021). Mekhaniko-tekhnolohichne obgruntuvannia protsesiv i obladnannia bezreshitnoho fraktsionuvannia zernovykh materialiv [Mechanical and technological substantiation of processes and equipment of lattice fractionation of grain materials] . *Extended abstract of Doctor's thesis. Hlevakha*, [in Ukrainian].
14. Hortynskij, V. V., Demskij, A. B. & Boryskyn, M. A. (1980). *Voprosy sepyrovannia na zernopererabatyvaiuschykh predpriatyj [Questions of separation at grain processing enterprises]*. Moskkow: Kolos [in Ukrainian].
15. Malys, A. Ya. & Demydov, A. R. (1962). *Mashyny dlia ochystky zerna vozdushnym potokom [Machines for cleaning grain by air flow]* . Moskow: Mashhyz [in Ukrainian].
16. Lojtsianskij, L. H. (1950). *Mekhanika zhydkosti y haza [Mechanics of liquid and gas]*. M.-L.: Hos. yzd. Tekhnyko-teor. lyt [in Ukrainian].
17. Barskij, M. D. (1980). *Fraktsionirovanye poroshkov [Fractionation of powders]*. Moskow [in Ukrainian].
18. Zuev, F. H. (1979). *Pnevmatycheskoe transportyrovanye na zernopererabatyvaiuschykh predpriatyakh [Pneumatic transportation at grain processing plants]*. Moskow: Kolos [in Ukrainian].
19. Neliubov, A. Y. & Vetrov, E. F. (1977). *Pnevmosteparyruischie systemy sel'skokhoziajstvennykh mashyn [Pneumatic separating systems of agricultural machines]*. Moskow: Mashynostoemye [in Ukrainian].
20. Ol'shanskij, V. P. & Ol'shanskij, S. V. (2009). O traektorii poleta vraschaishejsia sferycheskoj chastytisy [On the flight trajectory of a rotating spherical particle]. *Visnyk KhNTUSH – Bulletin of KhNTUSHG, Issue. 88*, 54 - 61. [in Ukrainian].
21. Stepanenko, S. P. & Kotov, B. I. (2018). Osnovni kontseptual'ni polozhennia pnevmatichnoho fraktsionuvannia zernovykh materialiv [Basic conceptual provisions of pneumatic fractionation of grain materials]. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia sil's'koho hospodarstva : zahal'noderzh. zb. – Mechanization and electrification of agriculture: nationwide. zb, Issue 8 (107)*, 80–88. [in Ukrainian].
22. Stepanenko S., Rogovskii, I., Titova, L., Trokhaniak, V., Trokhaniak, O. (2019). Experimental study in a pneumatic microbiocature separator with apparatus camera . *In: Bulletin of the Transilvania University of Brasov , Series II: Forestry, Wood Industry, Agricultural Food Engineering, Vol. 12 (61), no. 1* , pp. 117-128 [in English]
23. Stepanenko, S.P., Rogovskii, I.L., Titova, L.L., Trokhaniak, V.I., Solomka, O.V., Popyk & P.S., Shvidiam V.O. (2019). Experimental studies on drying conditions of grain crops with high moisture content in low-pressure environment . *INMATEH - Agricultural Engineering. Jan-Mar, Vol. 57, Issue 1*, pp.141-146 [in English]
24. Kotov, B.I., Kalinichenko, R.A., Stepanenko, S.P., Shvydya, V.O. & Lisetsky V.O. (2017). *Modeliuvannia tekhnolohichnykh protsesiv v typovykh ob'iektakh pisliabzbral'noi obrobky i zberihannia zerna (separatsiia, sushinnia, aktyvne ventyliuvannia, okholodzhennia) [Modeling of technological processes in typical objects of post-harvest processing and storage of grain (separation, drying, active ventilation, cooling)]* . Nizhyn: Vydavets' PP Lysenko M. M. [in Ukrainian].

**Borys Kotov**, Prof., DSc.

*Podillsky State Agrarian and Technical University (PDATU), Kamyanets-Podilsky, Ukraine*

**Serhii Stepanenko**, DSc., Senior Researcher

*National Scientific Center "Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture", Glevakha, Fastiv district, Kiyv region, Ukraine*

### **Theoretical Studies of the Motion of Grain Material Components With Artificially Formed Air Velocity Distribution in the Cross Section of the Channel**

The purpose of research to formulate a mathematical description of the movement of components of grain material in pneumatic channels with artificially formed distribution of air velocity in the cross section of the channel to improve the quality of separation (trajectory divergence) of grain material components.

The article considers studies of grain separation in pneumatic channels with artificially formed air velocity distribution in the cross section of the channel, to determine the rational form and parameters of material supply and options for separation of grain material into fractions.

The regularities of grain motion in the form of mathematical models of the dynamics of solid particle motion in air flow are theoretically investigated and established, which differ from those known in that they take into account the action of lateral forces, material concentration, and the application of power law and artificially formed exponential air distribution law) trajectories.

The solution of the system of nonlinear differential equations with initial conditions is made in the MathCad software environment in the form of grain motion trajectories in air flow, allows to calculate their motion trajectories that differ in sailing coefficients and determine rational values of pneumogravity and pneumoinertia parameters. Using the obtained dependences for the development of air separators, it is possible to determine the initial velocity of entry and direction of entry of grains into the air stream, as well as to determine the trajectories of the material in the air ducts with lower material unloading.

Conclusions:

1. Theories of grain motion are theoretically investigated and established in the form of mathematical models of solid grain motion dynamics in air flow, which differ from those known in that they take into account the action of lateral forces, material concentration, and the application of power and artificial exponential law (splitting) of grain movement trajectories by 20%.

2. The solution of the system of nonlinear differential equations with initial conditions is made in the MathCad software environment in the form of grain motion trajectories in the air stream, which allows to calculate their motion trajectories differing in sailing coefficients and determine rational values of pneumogravity and pneumoinertial separators.

**air flow, grain, Zhukovsky and Magnus forces, trajectory, separation process, pneumatic separator**

*Одержано (Received) 16.10.2021*

*Прорецензовано (Reviewed) 24.10.2021*

*Прийнято до друку (Approved) 29.11.2021*