



УДК 631.362

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ЧАСТОК В ПЛОСКОМУ НАХИЛЕНОМУ КАНАЛІ ПНЕВМАТИЧНОГО СЕПАРАТОРА

Бакум М.В. к.т.н.

Ольшанський В.П. д. фіз-мат. н.

Крекот М.М. інженер,

Винокуров М.О. інженер.

*Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка*

Тел. (057) 732-38-45, E-mail: kafedrasm@mail.ru

**Анотація** – на основі отриманих формул, при аналітичному розв’язку спрощених нелінійних рівнянь руху часток в однорідному повітряному потоці встановлені закономірності впливу кута нахилу плоского сепарувального каналу та швидкості повітряного потоку на переміщення часток з різними коефіцієнтами вітрильності.

**Ключові слова** – аналітичний розв’язок, рівняння руху, частинка, повітряний потік, нахилений канал, пневматичний сепаратор.

*Постановка проблеми.* Повітряні канали широко використовуються в сільськогосподарському виробництві. Проте закономірності руху матеріалу в них досліджені недостатньо. При квадратичній залежності аеродинамічної сили від відносної швидкості потоку повітря рівняння польоту частки є нелійними і для їх інтегрування використовують числові методи. Отримання аналітичних розв’язків пов’язані із значними математичними складнощами. Але їх отримання можливе після належного спрощення задачі Коші. Тому одержання наближених аналітичних розв’язків, які приводять до компактних розрахункових формул, залишається актуальною задачею, розв’язання якої спрощує дослідження закономірностей руху компонентів сільськогосподарських матеріалів в каналі.

*Аналіз останніх досліджень та публікацій.* Із останніх робіт за проблемою повітряної сепарації зерна відмітимо [1]. В роботі [2] обґрунтовано вплив живильника на ефективність сепарації у горизонтальному повітряному потоці. В дисертації [3] досліджено вплив нерівномірності потоку повітря по висоті каналу прямокутного перетину на

якість розділення зернових сумішей. В статті [4] описані будова і принцип роботи зигзагоподібного кільцевого пневмосепаратора. Результати роботи модернізованого сепаратора з нахиленим повітряним каналом при очищенні насіння овочевих культур опубліковані в [5, 6]. Загальні напрямки інтенсифікації попереднього очищення зерна повітряними потоками і особисті результати досліджень наведені авторами в роботі [7, 8].

*Постановка завдання.* Визначити закономірності руху частки на основі отриманих наближених компактних формул для розрахунку кінематичних параметрів часток під час їх руху в однорідному повітряному потоці в плоскому нахиленому до горизонту каналі.

*Основана частина.* Розглянемо повітряний прямокутний канал шириною  $h$  верхня і нижня стінки якого нахилені до горизонту під кутом  $\alpha$ . Вектор швидкості повітряного потоку  $\bar{V}$  приймаємо сталим і спрямованим вздовж стінок каналу. Траєкторію польоту часток розглянемо в повернутій на кут  $\alpha$  прямокутній системі координат  $XOY$ , наведеній на рис 1. В цій системі координат проекції траєкторії руху часток є розв'язками диференціальних рівнянь:

$$\ddot{x} - k(V - \dot{x})\sqrt{(V - \dot{x})^2 + \dot{y}^2} = g \sin \alpha; \quad (1)$$

$$\ddot{y} - k\dot{y}\sqrt{(V - \dot{x})^2 + \dot{y}^2} = g \cos \alpha,$$

де  $k$  – коефіцієнт вітрильності часток;

$g$  - прискорення вільного падіння; крапка над символом визначає похідну за часом  $t$ .

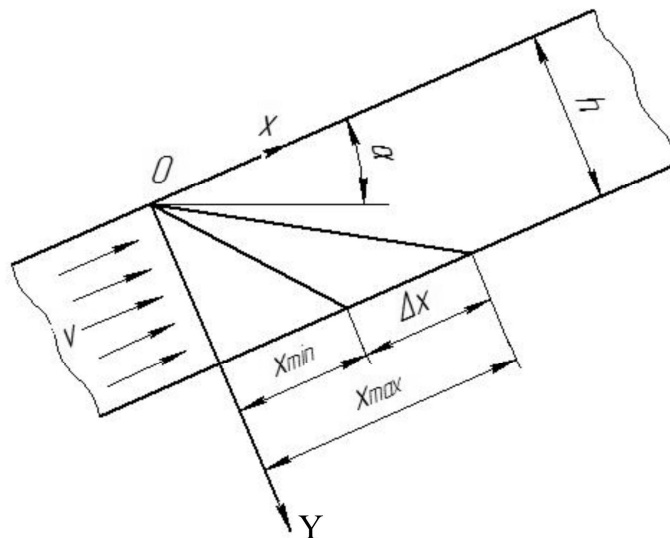


Рис. 1. Розрахункова схема.

Початкові умови до системи (1) приймаємо:

$$\dot{x}(0) = \mathcal{G}_1; \dot{y}(0) = \mathcal{G}_2; x(0) = 0; y(0) = 0, \quad (2)$$

де  $\mathcal{G}_1$  і  $\mathcal{G}_2$  – проекції початкової складової швидкості частки на осі  $OX$  та  $OY$ , відповідно.



Далі спростимо систему рівнянь (1). Враховуючи, що в каналі  $\dot{y}^2 \ll (V - \dot{x})^2$  систему рівнянь (1) запишемо у спрощеному вигляді:

$$\begin{aligned} \ddot{x} - k(V - \dot{x})^2 &= -g_1; \\ \ddot{y} + k\dot{y}(V - \dot{x}) &= g_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Інтеграл першого рівняння системи (4), з врахуванням (3), мають вигляд:

$$\dot{x}(t) = V - g^* \frac{\exp(2k g^* t) + c}{\exp(2k g^* t) - c}; \quad (5)$$

$$x(t) = (V + g^*) \cdot t - \frac{1}{k} \ln \frac{\exp(2k g^* t)}{1 - c},$$

$$\text{де } g^* = \sqrt{\frac{g \sin \alpha}{k}}; c = \frac{V - g_1 - g^*}{V - g_1 + g^*}.$$

Інтегрування другого рівняння системи (4), з врахуванням вихідних умов (3), дозволяють отримати формули для визначення швидкості та переміщення у вигляді:

$$\dot{y}(t) = \frac{1}{\exp(2k g^* t) - c} \left\{ \left[ g_2(1 - c) - \frac{g_2(1 + c)}{k g^*} \right] \exp(k g^* t) + \frac{g_2}{k g^*} [\exp(2k g^* t) + c] \right\}; \quad (6)$$

$$y(t) = A \cdot \ln \frac{\exp(k g^* t) - \sqrt{c}}{1 - \sqrt{c}} + B \cdot \ln \frac{\exp(k g^* t) + \sqrt{c}}{1 + \sqrt{c}} + Dt,$$

$$\text{де: } A = \frac{(1 - \sqrt{c})^2}{2\sqrt{c}(k g^*)^2} \left[ \frac{1 + \sqrt{c}}{1 - \sqrt{c}} k g^* g_2 - g_2 \right];$$

$$B = \frac{(1 + \sqrt{c})^2}{2\sqrt{c}(k g^*)^2} \left[ g_2 - \frac{1 - \sqrt{c}}{1 + \sqrt{c}} k g^* g_2 \right]; D = -\frac{g_2}{k g^*}.$$

Для розрахунків дальності польоту частинок вздовж каналу та визначення поділяючої спроможності необхідно знати час польоту  $t_n$ , який є коренем трансцендентного рівняння

$$y = (t_n) = h$$

Цей корінь із заданою точністю можна знаходити методом Н'ютона за формулою:

$$t_{i+1} = t_i - \frac{y(t_i) - h}{\dot{y}(t_i)}; i = 0, 1, 2, \dots, \quad (7)$$

де  $y(t)$  і  $\dot{y}(t)$  визначаються за рівняннями (6).

При виборі початкового наближення  $t_0$  необхідно врахувати нерівність



$$t_* < t_0 < t^*. \quad (8)$$

До нижньої границі

$$t_* = \sqrt{\left(\frac{g_2}{g_2}\right)^2 + \frac{2h}{g_2} - \frac{g_2}{g_2}}$$

приводить розв'язання диференційного рівняння

$$\ddot{y} = g_2,$$

яке задовольняє умовам (3).

Верхня границя  $t^*$  визначається з розв'язку задачі Коші для диференційного рівняння

$$\ddot{y} + \beta \dot{y} = g_2,$$

де  $\beta = k(V - g_1)$ .

Таким розв'язком є :

$$y(t) = \frac{1}{\beta} \left\{ (g_2 - \frac{g_2}{\beta}) [1 - \exp(-\beta t)] + g_2 t \right\}.$$

Рівність  $y(t^*) = h$  перетворюється в трансцендентне рівняння виду:

$$Z \exp(-Z) = \exp(a), \quad (9)$$

де  $Z = (1 - \frac{\beta g_2}{g_2}) \exp(-\beta t^*)$ ;

$$a = \ln(1 - \frac{\beta g_2}{g_2}) - \frac{\beta}{g_2} (\beta h - g_2) - 1.$$

Розв'язок рівняння (9) виражається через спеціальну функцію Ламберта  $W(\eta)$  [7, 8], що приводить до формули:

$$t^* = \frac{1}{\beta} \ln \frac{\beta g_2 - g_2}{g_2 W[-\exp(a)]}.$$

Значення функції Ламберта від'ємного аргументу можна знаходити методом лінійної інтерполяції за таблицею, наведеною в монографії [9, ст. 192].

Задаючи  $t_0$  в межах (8) отримуємо швидку збіжність ітерації за формулою (7). Визначивши таким способом, із заданою точністю  $t_n = t_{i+1}$ , це значення  $t$  необхідно підставити в формулу (5) і визначити дальність польоту часточок вздовж каналу.

З аналізу результатів досліджень видно, що зміна кута нахилу каналу до горизонту суттєво впливає на величину та напрямок переміщення часточок по його довжині. Так, при малих швидкостях повітряного потоку  $V < 6 \text{ м/с}$  на часточки більший вплив має сила тяжіння. За прийнятої системи координат переміщення має від'ємне значення, тобто часточки переміщуються вниз по каналу, а саме при



швидкості  $V = 2\text{ м/с}$  та  $\alpha = 10^\circ$  часточки з коефіцієнтами вітрильності від 0,20 до 1,20 переміщуються вниз по каналу, відповідно, в межах від 0,164 до 0,007 м.

При збільшенні кута  $\alpha \leq 55^\circ$  величина переміщення вниз по каналу плавно зростає майже за лінійною залежністю. Подальше збільшення  $\alpha > 55^\circ$  забезпечує зростання інтенсивності зміни величини переміщення. Так, при  $\alpha = 55^\circ$  дальність польоту часточок з коефіцієнтами вітрильності від 0,20 до 1,20 змінюється в межах, відповідно, від -0,001 до -0,333 м. Збільшення  $\alpha$  до  $85^\circ$  призводить до переміщення часточок з  $k = 0,20$  на -2,603 м, а з  $k = 1,20$  на -0,719 м.

Зміна кута  $\alpha$ , при  $V = 6\text{ м/с}$  (рис. 2), призводить до зміни напрямку переміщення часточок, з більшістю досліджуваних коефіцієнтів вітрильності, в каналі. Часточки з  $k = 0,20$ , при зміні  $\alpha > 65^\circ$ , переміщуються вниз по каналу (від 0 до -0,318 м). Часточки з більшими коефіцієнтами вітрильності переміщуються вверх по каналу. По мірі збільшення коефіцієнта вітрильності часточок величина їх переміщення зростає. Тобто на зростання величини переміщення суттєво впливає кут нахилу каналу до горизонту. Так, якщо часточки з  $k = 0,45$ ;  $k = 0,70$ ;  $k = 0,95$  та  $k = 1,20$  при  $\alpha = 10^\circ$  переміщуються, відповідно, на 0,447; 0,638; 0,789 та 0,912 м, то при  $\alpha = 55^\circ$  на 0,460; 0,772; 1,010 та 1,199 м, а при  $\alpha = 80^\circ$  - на 1,715; 2,989; 3,939 та 4,719 м.

При більшій швидкості  $V > 7,0\text{ м/с}$  напрям переміщення часточок з різним  $k$  однаковий, а величина суттєво залежить від коефіцієнта вітрильності часточки та кута нахилу каналу до горизонту. Так, зміна коефіцієнта вітрильності часточок від 0,20 до 1,20, при  $\alpha = 10^\circ$  та  $V = 10\text{ м/с}$ , призводить до зростання переміщення вверх по каналу на відстань від 0,550 до 1,895 м. Збільшення кута нахилу каналу до  $40^\circ$  не призводить до суттєвої зміни величини переміщення часточок. При подальшому збільшенні кута переміщення часточок з великою вітрильністю зростає більш інтенсивно. Інтенсивне зростання переміщення часточок з малим коефіцієнтом вітрильності настає при більших значеннях кута  $\alpha$  ( $\alpha > 65^\circ$ ). При  $\alpha = 85^\circ$  переміщення часточок з  $k$  рівним 0,45; 0,70; 0,95 та 1,20 буде найбільшим і становитиме, відповідно: 5,923; 7,845; 9,277 та 10,471 м.

Таким чином, аналіз зміни величини переміщення часточок з різними коефіцієнтами вітрильності показує, що поділяюча здатність каналу зростає із збільшенням кута його нахилу, але при цьому також зростають його габаритні розміри (довжина). Так, наприклад, поділяюча здатність каналу для часточок з коефіцієнтами вітрильності  $k = 0,45$  і 0,70 при збільшенні кута нахилу каналу від  $10^\circ$  до  $40^\circ$  (при



$V = 6 \text{ м/с}$ ) зросла в 1,28 рази а необхідна довжина каналу від 0,638 до 0,659 м, тобто в 1,03 рази.

При збільшенні кута нахилу каналу з  $40$  до  $55^\circ$  поділяюча здатність зростає в 1,26 рази, а необхідна довжина з 0,659 до 0,772 м (в 1,17 рази), тобто інтенсивність зростання поділяючої здатності перевищує інтенсивність зростання довжини каналу в 1,08 рази. Збільшення кута нахилу з  $40$  до  $55^\circ$ , в порівнянні із збільшенням від  $10$  до  $40^\circ$ , збільшить поділяючу здатність каналу в 0,99 рази, при цьому необхідна довжина каналу зростає в 1,14 рази, тобто інтенсивність зростання необхідної довжини перевищує в 0,15 рази інтенсивність зростання його поділяючої здатності.

Слід зазначити, що для часточок з різними коефіцієнтами вітрильності можна визначити швидкість повітряного потоку і кут нахилу каналу при яких забезпечується повне (найкраще) розділення компонентів насінневої суміші. Наприклад, при  $V = 6 \text{ м/с}$ , в каналі нахиленому під кутом  $\alpha = 65^\circ$  до горизонту компоненти насінневої суміші з коефіцієнтами вітрильності  $k$  рівними 0,20 і 0,45 розділяються повністю.

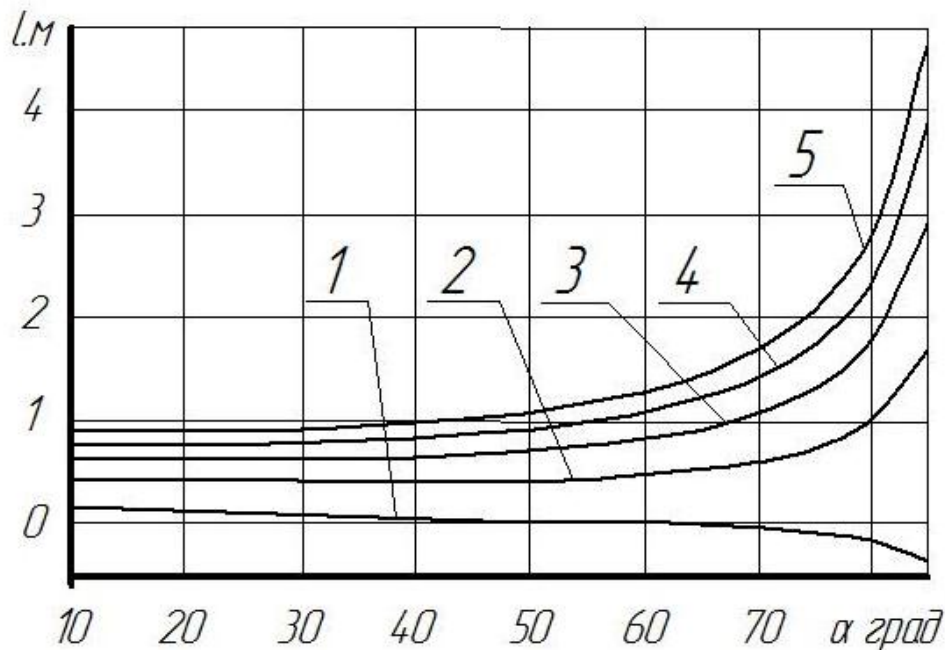


Рис. 2. Залежність дальності польоту  $l$  часточок у нахиленому каналі від величини кута  $\alpha$  нахилу, при  $V = 6 \text{ м/с}$ :

1 -  $k = 0,20$ ; 2 -  $k = 0,45$ ; 3 -  $k = 0,70$ ; 4 -  $k = 0,95$ ; 5 -  $k = 1,20$ .

Суттєвий вплив на поділяючу здатність має швидкість повітряного потоку в каналі (рис. 3). Так, при  $\alpha = 30^\circ$  та  $V = 1 \text{ м/с}$ , часточки з  $k$  рівним 0,20; 0,45; 0,70; 0,95 та 1,20 переміщуються на відстань відповідно: -0,148; -0,120; -0,094; -0,070 та -0,047 м, а при  $V = 10 \text{ м/с}$  – вгору на 0,520; 1,112; 1,515; 1,809; 2,032 м. При встановленні каналу

під кутом  $45^\circ$  і  $V = 1\text{ м/с}$  часточки переміщуються на відстань:  $-0,267$ ;  $-0,229$ ;  $-0,195$ ;  $-0,163$  та  $-0,135$  м, а при  $V = 10\text{ м/с}$  - на  $0,557$ ;  $1,256$ ;  $1,724$ ;  $2,061$  та  $2,316$  м. Якщо  $\alpha = 60^\circ$  і  $V = 1\text{ м/с}$  дальність польоту часточок становитиме  $-0,468$ ;  $-0,410$ ;  $-0,359$ ;  $-0,313$ ;  $-0,272$  м, та  $0,683$ ;  $1,604$ ;  $2,196$ ;  $2,614$ ;  $2,928$  м при  $V = 10\text{ м/с}$ .

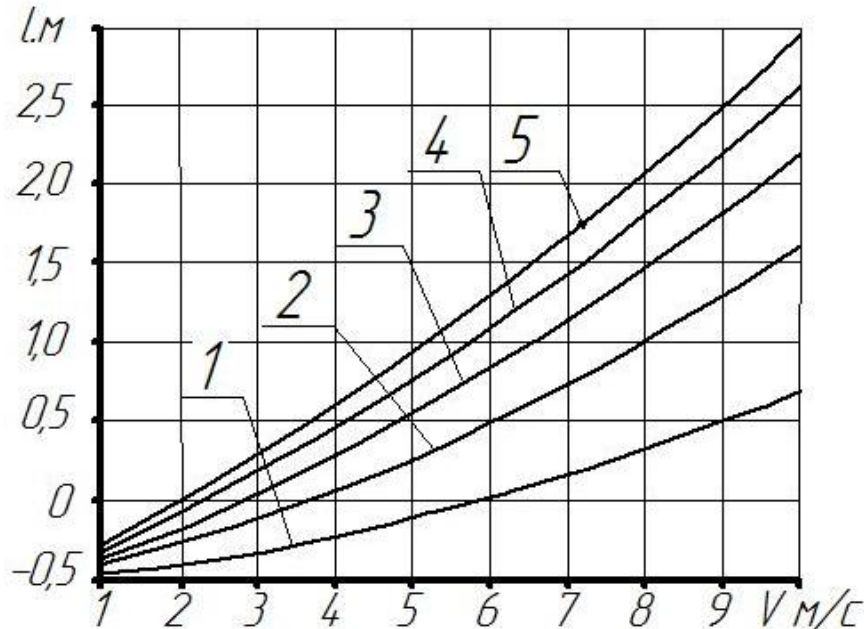


Рис. 3. Залежність дальності польоту  $l$  часточок у нахиленому каналі від швидкості  $V$  повітряного потоку, при  $\alpha = 60^\circ$ :  
1 -  $k = 0,20$ ; 2 -  $k = 0,45$ ; 3 -  $k = 0,70$ ; 4 -  $k = 0,95$ ; 5 -  $k = 1,20$ .

Аналіз досліджень свідчить, що збільшення швидкості повітряного потоку призводить до більш інтенсивного підвищення поділяючої здатності, яка реалізується у каналах більшої довжини. Причому, слід зазначити, що інтенсивність зростання поділяючої здатності для компонентів з різними коефіцієнтами вітрильності неоднакова. З отриманих результатів досліджень видно що інтенсивність зміни поділяючої здатності компонентів з великим значенням  $k = 0,95 \dots 1,20$  змінюється менш інтенсивно, ніж для часточок з малими значеннями  $k = 0,20 \dots 1,45$ , для прийнятого діапазону зміни швидкостей повітряного потоку. Необхідна довжина сепарувального каналу змінюється в більшому діапазоні, від 2 до 3 м, для часточок з більшим коефіцієнтом вітрильності, ніж для часточок з меншим коефіцієнтом, який знаходиться в межах від 0,8 до 0,68 м.

**Висновки.** Аналізом теоретичних досліджень впливу кута нахилу каналу до горизонту на рух частинок виявлено, що його зміна до  $40^\circ$  несуттєво впливає на величину переміщення частинок і необхідну довжину робочої частини каналу. Подальше збільшення кута нахилу забезпечує зростання інтенсивності зміни величини переміщення.



Поділяюча здатність каналу для частинок з коефіцієнтами вітрильності  $k = 0,45$  і  $0,70 \text{ м}^{-1}$  при збільшенні кута нахилу каналу від  $10$  до  $25^\circ$  (при  $V = 6 \text{ м/с}$ ) змінилась несуттєво, а його необхідна робоча довжина збільшилась в  $1,4$  рази. Таким чином, інтенсивність зростання необхідної довжини сепарувального каналу перевищує зростання поділяючої здатності на цьому діапазоні зміни кута його нахилу в  $2,451$  рази. При зміні  $\alpha$  від  $25$  до  $40^\circ$  поділяюча здатність зростає в  $1,162$  рази. При зміні  $\alpha$  з  $40$  до  $55^\circ$  поділяюча здатність каналу збільшується в  $1,26$  рази а необхідна робоча довжина в  $1,17$  рази що забезпечує перевищення інтенсивності зростання поділяючої здатності інтенсивності необхідної довжини робочого каналу лише в  $1,08$  рази. Подальше збільшення кута нахилу каналу з  $55$  до  $70^\circ$  забезпечує зростання поділяючої здатності в  $1,489$  рази а його необхідної довжини в  $1,879$  рази. Таким чином у цьому діапазоні зміни кута нахилу вже інтенсивність зростання довжини перевищує інтенсивність зростання поділяючої здатності в  $1,262$  рази. Для ефективного розділення насінневих сумішей раціональний діапазон зміни кутів нахилу повітряного каналу становить від  $40$  до  $50^\circ$ .

Варіюванням величиною кута нахилу каналу і швидкістю повітряного потоку можна змінювати характеристики переміщення частинок і напрямок їх переміщення в нахиленому сепарувальному каналі. Так, при  $V = 6 \text{ м/с}$  в каналі нахиленому під кутом  $\alpha > 65^\circ$  до горизонту компоненти насінневої суміші з коефіцієнтом вітрильності  $k = 0,20 \text{ м}^{-1}$  рухаються вниз по каналу, а з  $k > 0,45 \text{ м}^{-1}$  - ввєрх, що забезпечує повне їх розділення.

#### Література

1. *Васильковський М.І.* Аналіз сучасного стану повітряної сепарації зерна / *М.І. Васильковський, С.Я. Гончарова, С.М. Леценко, О.В. Нестеренко* // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. – Вип. 36. – Кіровоград: КНТУ, 2006. – С. 11-114.
2. *Єрмак В.П.* Вдосконалення способу сепарування насіння соняшника у повітряних потоках : Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11 / *В.П. Єрмак* – Луганськ, ЛНАУ, 2003 – 18 с.
3. *Абдуєв М.М.* Обґрунтування параметрів сепаратора з нахиленим повітряним каналом для розділення зернових сумішей : дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11 / *М.М. Абдуєв.* – Харків: ХНТУСГ ім. П. Василенка, 2006. – 200 с.
4. *Степаненко С.П.* Дослідження процесу пневматичної сепарації насіння в кільцевому зигзагоподібному сепараторі / *С.П. Степаненко* // Механізація сільськогосподарського виробництва. – Харків : ХНТУСГ. – 2008. – С. 59–65.





5. Бакум М.В. Дослідження впливу основних параметрів пневматичного сепаратора на якість очищення насіння редиски / М.В. Бакум., М.М. Крекот // Збірник наукових статей. Сільськогосподарські машини. - Луцьк: ЛНТУ, 2009. – Вип. 18. С. 14 – 19.
6. Бакум М.В. Дослідження можливості підвищення посівних властивостей насіння дині / М.В. Бакум, М.М. Крекот, М.М. Абдуєв, О.С. Вотченко, В.П. Леонов, М.В. Могильний // Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка. – Харків: ХНТУСГ ім. Петра Василенка, 2010. - Вип. 93. Т.1.– С. 82-88.
7. Corless R.M. On The Lambert W Function / R.M. Corless, G.H. Gonnet, D.E.G. Hare, D.J. Jeffrey, D.E. Knuth // Advances in Computational Math., V. 5, 1996, p. 329-359.
8. Fariel S. Lambert function and new non-extensive form of entropy / S. Fariel // IMA Journal of Applied Mathematics, V. 72, 2007, p. 785-800.
9. Кучеренко С.І. Балістика крапель, які випаровуються при польоті / С.І. Кучеренко, В.П. Ольшанський, С.В. Ольшанський, Л.М. Тищенко. – Харків: 2007. – 304 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЧЕК В ПЛОСКОМ НАКЛОНЕННОМ КАНАЛЕ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО СЕПАРАТОРА

Н.В. Бакум, В.П. Ольшанский, Н.Н. Крекот, Н.А. Винокуров

**Аннотація** – на основі отриманих формул, при аналітичному розв'язанні спрощених нелінійних рівнянь руху частинок в однорідному повітряному потоці встановлені закономірності впливу кута нахилу плоского сепаруючого каналу та швидкості повітряного потоку на переміщення частинок з різними коефіцієнтами парусності.

## INVESTIGATION OF THE PARAMETERS OF MOTION OF PARTICLES IN A PLANE CHANNEL INCLINATION PNEUMATIC SEPARATOR

N. Bakum, V. Olshanskiy, N. Krekot, N. Vinokurov

### *Summary*

**On the basis of the formulas, the analytical solution of the simplified nonlinear equations of motion of particles in a uniform air flow regularities influence the angle of a plane separating the channel and the air flow rate on the movement of particles with different coeff.**