

УДК 631.362

Дослідження параметрів руху часток в плоскому нахиленому каналі пневматичного сепаратора

М.В. Бакум, В.П. Ольшанський, М.М. Крекот

Харьковский национальный технический университет сельского хозяйства
 имени Петра Василенко (г. Харьков, Украина)

На основі отриманих формул, при аналітичному розв'язку спрощених нелінійних рівнянь руху часток в однорідному повітряному потоці встановлено основні закономірності переміщення часток з різними коефіцієнтами вітрильності в квазігоризонтальному сепарувальному каналі.

Ключові слова: часточка, диференціальні рівняння, пневматичний сепаратор, насіннева суміш, сортування.

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 нелінійними 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 [2, 3]. 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 [8].

Метою досліджень є визначення закономірності руху частки на основі отриманих наближених компактних формул для розрахунку кінематичних параметрів часток під час їх руху в однорідному повітряному потоці в плоскому каналі з малим кутом нахилу до горизонту.

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

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

де k — коефіцієнт вітрильності часток; g — прискорення вільного падіння; крапка над символом визначає похідну за часом t .

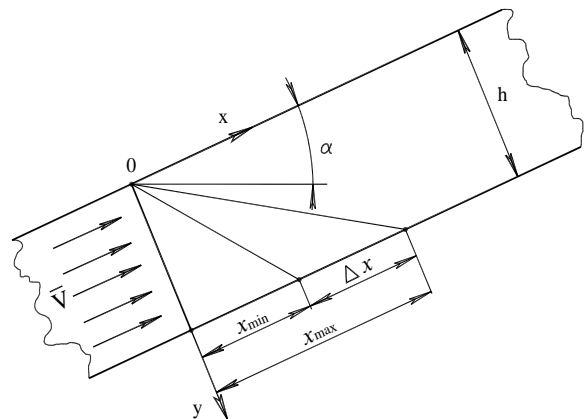


Рис. 1. Розрахункова схема

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:

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

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

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= V - g^* \frac{\exp(2k\mathcal{G}^*t) + c}{\exp(2k\mathcal{G}^*t) - c}; \\ x(t) &= (V + \mathcal{G}^*) \cdot t - \frac{1}{k} \ln \frac{\exp(2k\mathcal{G}^*t)}{1 - c}, \end{aligned} \quad (5)$$

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:

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

$$\begin{aligned} y(t) &= A \cdot \ln \frac{\exp(k\mathcal{G}^*t) - \sqrt{c}}{1 - \sqrt{c}} + \\ &+ B \cdot \ln \frac{\exp(k\mathcal{G}^*t) + \sqrt{c}}{1 + \sqrt{c}} + Dt \end{aligned}$$

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

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

$$D = -\frac{g_2}{k\mathcal{G}^*}.$$

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 враховувати 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:

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

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

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

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

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

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 $V \geq 6$ м/с на часточки більший вплив має сила тяжіння. За прийнятої системи координат переміщення має від'ємне значення, тобто часточки переміщуються вниз по каналу. З графіку рис. 2 видно, що при швидкості $V = 2$ м/с та $\alpha = 10^\circ$ часточки з коефіцієнтами вітривності від 0,2 до 1,2 пе-

реміщуються 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 0,2 до 1,2 змінюється в межах, відповідно, від -0,001 до -0,333 м. Збільшення α до 85° призводить до переміщення часточок з $k = 0,2$ на -2,603 м, а з $k = 1,2$ на -0,719 м.

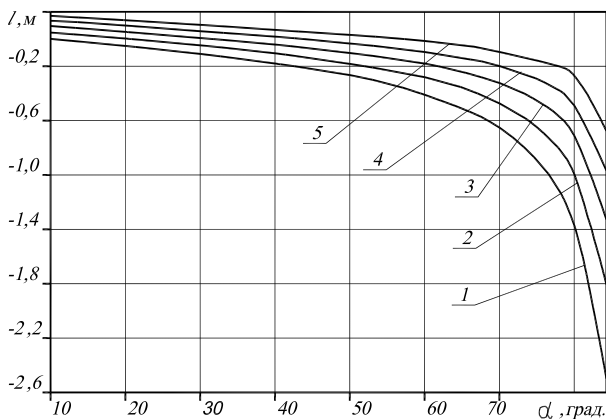


Рис. 2. Залежність дальності польоту l часточок у нахиленому каналі від величини кута α нахилу, при $V = 2$ м/с: 1 — $k = 0,20$; 2 — $k = 0,45$; 3 — $k = 0,70$; 4 — $k = 0,95$; 5 — $k = 1,20$

Зміна кута α , при $V = 6$ м/с (рис. 3), призводить до зміни напрямку переміщення часточок, з більшістю досліджуваних коефіцієнтів вітрильності, в каналі. Часточки з $k = 0,2$, 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 $V > 7,0$ м/с (рис. 4) напрям переміщення часточок з різним k одна-

ковий, а величина суттєво залежить від коефіцієнта вітрильності часточки та кута нахилу каналу до горизонту.

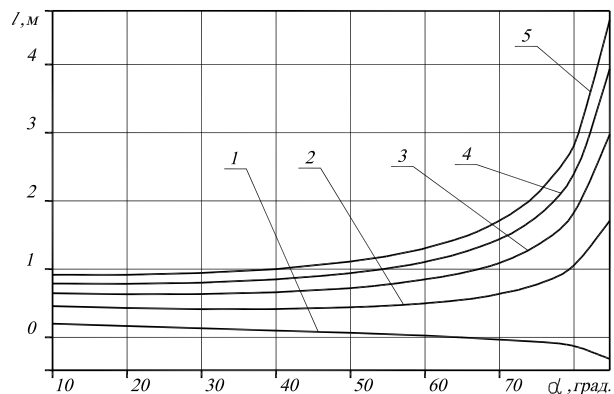


Рис. 3. Залежність дальності польоту l часточок у нахиленому каналі від величини кута α нахилу, при $V = 6$ м/с: 1 — $k = 0,20$; 2 — $k = 0,45$; 3 — $k = 0,70$; 4 — $k = 0,95$; 5 — $k = 1,20$

Так, зміна коефіцієнта вітрильності часточок від 0,20 до 1,20, при $\alpha = 10^\circ$ та $V = 10$ м/с, призводить до зростання переміщення вверх по каналу на відстань від 0,550 до 1,895 м. Збільшення кута нахилу каналу до 40° 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 α ($\alpha > 65^\circ$). 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 (рис. 2 – 5) 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 до 40° (при $V = 6$ 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° 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 інтенсив-

ність зростання довжини каналу в 1,08 рази. Збільшення кута нахилу з 40 до 55°, в порівнянні із збільшенням від 10 до 40°, 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.

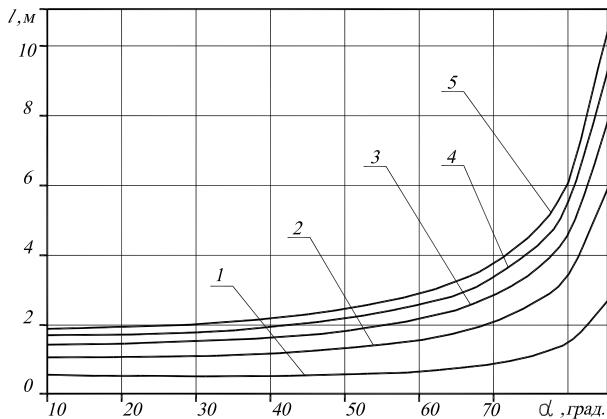


Рис. 4. Залежність дальності польоту l часточок у нахиленому каналі від величини кута α нахилу, при $V = 10$ м/с: 1 — $k = 0,20$; 2 — $k = 0,45$; 3 — $k = 0,70$; 4 — $k = 0,95$; 5 — $k = 1,20$

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 $V = 6$ 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.

Суттєвий вплив на поділяючу здатність має швидкість повітряного потоку в каналі (рис. 5 – 7). Так, при $\alpha = 30^\circ$ та $V = 1$ 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 $V = 10$ м/с — вгору на 0,520; 1,112; 1,515; 1,809; 2,032 м. При встановленні каналу під кутом 45° і $V = 1$ м/с часточки переміщуються на відстань: $-0,267$; $-0,229$; $-0,195$; $-0,163$ та $-0,135$ м, а при $V = 10$ м/с — на 0,557; 1,256; 1,724; 2,061 та 2,316 м. Якщо $\alpha = 60^\circ$ і $V = 1$ 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 $V = 10$ м/с. Аналіз досліджень

свідчить, що збільшення швидкості повітряного потоку призводить до більш інтенсивного підвищення поділяючої здатності, яка реалізується у каналах більшої довжини.

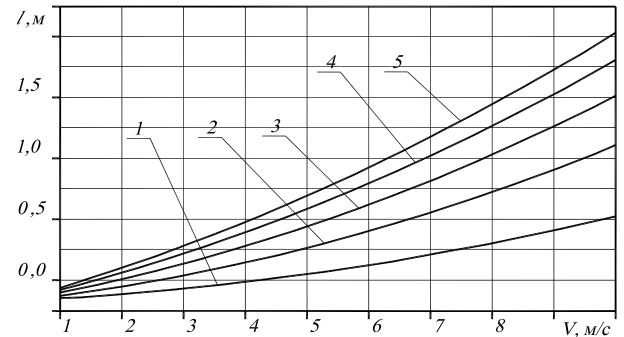


Рис. 5. Залежність дальності польоту l часточок у нахиленому каналі від швидкості V повітряного потоку, при $\alpha = 30^\circ$: 1 — $k = 0,20$; 2 — $k = 0,45$; 3 — $k = 0,70$; 4 — $k = 0,95$; 5 — $k = 1,20$

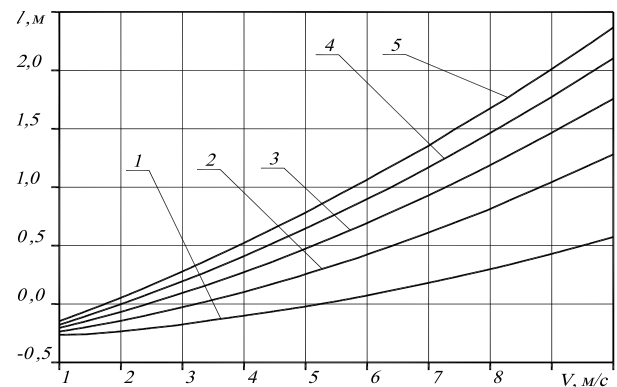


Рис. 6. Залежність дальності польоту l часточок у нахиленому каналі від швидкості V повітряного потоку, при $\alpha = 45^\circ$: 1 — $k = 0,20$; 2 — $k = 0,45$; 3 — $k = 0,70$; 4 — $k = 0,95$; 5 — $k = 1,20$

Причому, слід зазначити, що інтенсивність зростання поділяючої здатності для компонентів з різними коефіцієнтами вітрильності неоднакова. У наведених на рис. 5 – 7 результатах досліджень інтенсивність зміни поділяючої здатності компонентів з великим значенням $k = 0,95 - 1,2$ змінюється менш інтенсивно, ніж для часточок з малими значеннями $k = 0,2 - 1,45$, 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 вітри-

льності, ніж для часточок з меншим коефіцієнтом, який знаходиться в межах від 0,8 до 0,68 м.

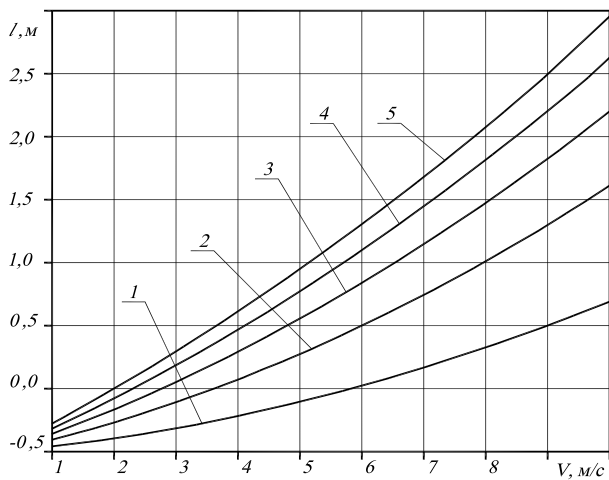


Рис. 7. Залежність дальності польоту l часточок у нахиленому каналі від швидкості V повітряного потоку, при $\alpha = 60^\circ$: 1 — $k = 0,20$; 2 — $k = 0,45$; 3 — $k = 0,70$; 4 — $k = 0,95$; 5 — $k = 1,20$

Висновки.

1. В результаті проведених теоретичних досліджень створена спрощена нелінійна математична модель руху компонентів насінневої суміші у нахиленому плоскому каналі пневматичного сепаратора, отриманий аналітичний розв'язок спрощених нелінійних рівнянь руху часток в сепарувальному каналі, а також формули для розрахунків швидкості та траєкторії їх польоту в нахиленому каналі.

В результаті аналізу проведених теоретичних досліджень встановлено, що величина переміщення часток вздовж каналу та його поділяюча здатність суттєво залежить від швидкості повітряного потоку і коефіцієнтів вітрильності часток.

2. Аналізом теоретичних досліджень впливу кута нахилу каналу до горизонту на рух часточок виявлено, що його зміна до 40° несуттєво впливає на величину переміщення часточок і необхідну довжину робочої частини каналу. Подальше збільшення кута нахилу забезпечує зростання інтенсивності зміни величини переміщення.

При $\alpha = 55^\circ$ і $V = 2$ м/с дальність польоту часточок з коефіцієнтами вітрильності від 0,20 до 1,20 змінюється в межах від 0,001 до 0,333 м, а при $\alpha = 85^\circ$ від $-2,603$ до $-0,719$ м. При $V = 10$ м/с, відповідно, від 0,625 до 2,667 м, та від 2,681 до 10,472 м.

3. Поділяюча здатність каналу для часточок з коефіцієнтами вітрильності $k = 0,45$ і $0,70$ при збільшенні кута нахилу каналу від 10 до 25° (при $V = 6$ м/с) зросла в 0,995 рази а його необхідна робоча довжина в 0,406 рази. Тобто інтенсивність зростання поділяючої здатності на цьому діапазоні зміни кута нахилу сепарувального каналу перевищила зростання його необхідної довжини в 2,451 рази. При зміні α від 25 до 40° поділяюча здатність зростає в 1,162 рази. При зміні α з 40 до 55° 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° 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 до горизонту становить від 40 до 50° .

4. Варіюванням величиною кута нахилу каналу і швидкістю повітряного потоку можна змінювати характеристики переміщення часточок і напрямки їх переміщення в нахиленому сепарувальному каналі.

Так, при $V = 6$ м/с в каналі нахиленому під кутом $\alpha > 65^\circ$ до горизонту компоненти насінневої суміші з коефіцієнтом вітрильності $k = 0,20$ рухаються вниз по каналу, а з $k > 0,45$ — вгору, що забезпечує повне їх розділення.

Література

1. Васильковський М.І. Аналіз сучасного стану повітряної сепарації зерна / М.І. Васильковський, С.Я. Гончарова, С.М. Лещенко, 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. Обґрунтування способу сепарування соняшника у повітряних потоках: Автореф. дис. канд. техн. наук. — Луганськ, 2003. — 21 с.
3. Абдуєв М.М. Обґрунтування параметрів сепаратора з нахиленим повітряним каналом

для розділення зернових сумішей: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Харків, 2007. – 21 с.

4. Степаненко С.П. Дослідження процесу пневматичної сепарації насіння в кільцевому зигзагоподібному сепараторі // Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник ХНТУСГ. – 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. Могильній // Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка.

– Харків: ХНТУСГ ім. Петра Василенка, 2010. – Вип. 93. Т.1. – С. 82 - 88.

7. Кучеренко С.І. Балістика крапель, які випаровуються при польоті / С.І. Кучеренко, В.П. Ольшанський, С.В. Ольшанський, Л.М. Тищенко // – Харків: ХНТУСГ, 2007. – 304 с.

8. Лещенко С.М. Підвищення ефективності попереднього очищення зернових сумішей / С.М. Лещенко, О.М. Васильковський, М.І. Васильковський, В.В. Гончаров // Сільськогосподарські машини: 36. наук. ст. – Вип. 18. Луцьк: ЛНТУ, 2009. – С. 230 - 235.

9. 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.

10. Fariel S. Lambert function and new non-extensive form of entropy / S. Fariel // IMA Journal of Applied Mathematics, V. 72, 2007, p. 785 - 800.

Аннотация

Исследования параметров движения частиц в плоском наклонном канале пневматического сепаратора

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

На основе полученных формул, при аналитическом решении упрощенных нелинейных уравнений движения частиц в однородном воздушном потоке установлена основная закономерность перемещения частиц с разными коэффициентами парусности в квазигоризонтальном сепарирующем канале.

Ключевые слова: *частица, дифференциальные уравнения, пневматический сепаратор, семенная смесь, сортирование.*

Abstract

Researches motion parameters of the particles in a plane sloping channel pneumatic separator

N.V. Bakum, V.P. Olshanskiy, N.N. Krekot

The basic laws of motion of particles with different coefficients sail in quasi-horizontal separation channel, the analytical solution of the simplified nonlinear equations in a uniform air flow motion of particles.

Keywords: *piece, differential equations, a pneumatic separator, seed mixture, sorting.*

Представлено: О.І.Завгородній / Presented by: O.I.Zavgorodniy

Рецензент: О.А.Шептур / Reviewer: O.A.Sheptur

Подано до редакції / Received: 30.03.2015