

## ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗДІЛЕННЯ ДРІБНОНАСІННЄВИХ СУМІШЕЙ У ПНЕВМОЕЛЕКТРИЧНОМУ КАНАЛІ

*С. Ковалишин, к. т. н., І. Ніщенко, к. т. н., Ю. Ковальчик, д. ф.-м. н.,  
В. Дадак, аспірант*

*Львівський національний аграрний університет*

**Постановка проблеми.** Збільшення валових зборів насіння сільськогосподарських культур неможливе без достатньої кількості високоякісного посівного матеріалу [4], який за своїми посівними якостями, кількісним вмістом у ньому важкорозділюваних домішок бур'янів відповідав би існуючим стандартам [10]. Домогтись цього можливо удосконаленням технології післязбиральної обробки та технічних засобів, які дозволяють її зреалізувати. Особливо це актуально для посівного матеріалу дрібнонасінневих культур (овочевих, технічних, кормових трав тощо). Доведення його до необхідних посівних кондицій супроводжується значними труднощами об'єктивного характеру [1; 12]. З огляду на це існує необхідність у проведенні додаткової очистки – на спеціальних насінноочисних машинах. Серед останніх значне місце відводиться пневмосепараторам, де очистка насінневого матеріалу здійснюється за аеродинамічними властивостями компонентів суміші.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розділення насінневих сумішей за аеродинамічними властивостями їх складових частин є достатньо поширеним прийомом [8; 14; 15]. В його основу покладено здатність частинок по-різному чинити опір повітряному потокові. Цей опір залежить від низки факторів і неоднаковий для окремих із них [11]. Тому частинки рухаються в повітряному потоці з неоднаковими швидкостями і за різними траєкторіями [6].

На сьогодні теоретично достатньо повно висвітлені питання сепарування насінневих сумішей за аеродинамічними властивостями в пневмосепараторах [2; 3; 7]. Низка авторів присвятила свої дослідження визначенню критичної швидкості витання і коефіцієнтів парусності компонентів насінневих сумішей [3], розрахункам повітряного потоку [14] та обґрунтуванню параметрів вентиляторів для їх створення [2], визначенню конструктивних форм та геометричних розмірів пневмоканалів тощо [14].

Окремі з них досліджували силову взаємодію частинок насінневих сумішей з повітряним потоком [7], її вплив на траєкторії руху та встановлювали можливість їх розділення за аеродинамічними властивостями.

Ця взаємодія враховувала сукупний вплив на частинки сили ваги та сили повітряного потоку. Проте за умови вдосконалення конструкцій пневмосепараторів за допомогою використання в їх сепарувальних каналах як додаткового робочого органа електричного поля на частинки діятиме електрична сила. У такому разі виникає необхідність дослідження силової взаємодії частинок, які сприйматимуть

одночасно дію як гравітаційних, так і електричних сил, та траєкторій їх руху в каналі пневмоелектросепаратора.

**Постановка завдання.** Підвищити ефективність розділення важкорозділюваних насінневих сумішей у повітряних потоках можливо за рахунок створення на них додаткової силової дії, величина якої була б різною для біологічної повноцінної насіннини культури та для нежиттєздатної (без зародка) чи насіннини бур'яну. Зреалізувати таку силову дію на компоненти насінневих сумішей можна створенням у сепарувальному каналі однорідного електричного поля. У такому разі існує необхідність дослідження сукупної дії сил на поведінку частинок насінневих сумішей у даному каналі.

**Виклад основного матеріалу.** Для розгляду поведінки частинки насінневої суміші в каналі пневмоелектричного сепаратора необхідно розглянути й дати характеристику сил, які діють на неї. У таких сепараторах здебільшого розділяють частинки сумішей, які мають форму еліпсоїда. З огляду на це розглянемо силовий вплив на насіннину саме такої форми. Охарактеризувати його можна, використавши дані, наведені на рис. 1.

На насіннину діють рівнодійні трьох силових факторів:

- сил ваги  $G$ , яка напрямлена вертикально вниз і прикладена в центрі маси частинки:

$$G=mg, \quad (1)$$

де  $m$  – маса насіннини;

$g$  – прискорення вільного падіння;

- електростатичних сил  $F_e$ , яка напрямлена горизонтально і прикладена на осі симетрії еліпсоїдної частинки в точці  $O_1$ :

$$F_e=E q, \quad (2)$$

де  $E$  – напруженість електростатичного поля;

$q$  – заряд частинки;

- сил  $F_n$ , викликаних дією на частинку повітряного потоку:

$$F_n=K V_n A_m, \quad (3)$$

де  $V_n$  – швидкість повітряного потоку;

$A_m$  – площа міделевого перерізу;

$K$  – коефіцієнт опору середовища.

Рівнодійна сил  $F_n$  напрямлена вертикально вгору і прикладена в геометричному центрі еліпсоїда  $O$ .

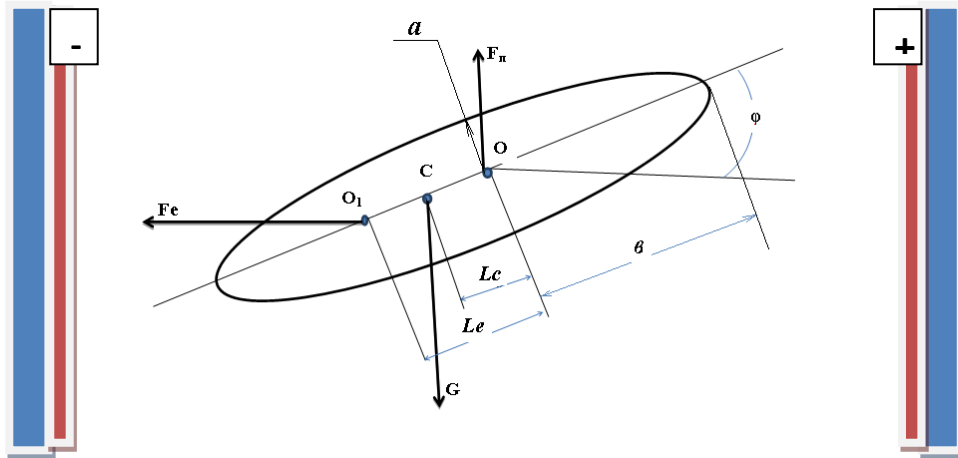


Рис. 1. Силова дія на частинку насінневої суміші в пневмоелектричному каналі:

$F_e$  – електрична сила;  $G$  – сила земного тяжіння;  $F_n$  – сила дії повітряного потоку;  $C$  – центр маси частинки;  $O_1$  – центр заряду;  $O_2$  – геометричний центр;  $L_c$  – відстань від геометричного центра  $O$  до центра мас  $C$ ;  $L_e$  – відстань від геометричного центра  $O$  до центра заряду  $O_1$ .

Розглянемо окремі випадки дії вказаних сил на частинку насінневої суміші.

1. Сила повітряного потоку  $F_n$  за величиною рівна силі ваги  $G$ .

Тоді рівнодійна трьох сил дорівнюватиме  $R=F_e$  і проходить через центр мас  $C$ , якщо виконується умова:

$$\sum_{k=1}^n M_e(F_n) = 0. \quad (4)$$

Розпишемо умову (4):

$$F_n \cdot L_c \cdot \cos \varphi - F_e \cdot L_e \cdot \sin \varphi = 0. \quad (5)$$

Оскільки  $F_n=G$ , то з (5) визначаємо значення кута  $\varphi$ :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{G \cdot L_c}{F_e \cdot L_e}. \quad (6)$$

У такому разі з (3) можна знайти швидкість повітряного потоку:

$$V_n = \frac{G}{K \cdot A_m}, \quad (7)$$

де  $A_m$  – міделева площа частинки.

Для визначення за вказаних умов сили повітряного потоку необхідно розрахувати міделеву площу  $A_m$  частинки насінневої суміші – проекцію площі насінини на площину, перпендикулярну до напрямку повітряного потоку в каналі пневмоелектросепаратора. При цьому необхідно враховувати, що насінина має форму еліпсоїда обертання з півсями  $a$  і  $b$  (рис. 2).

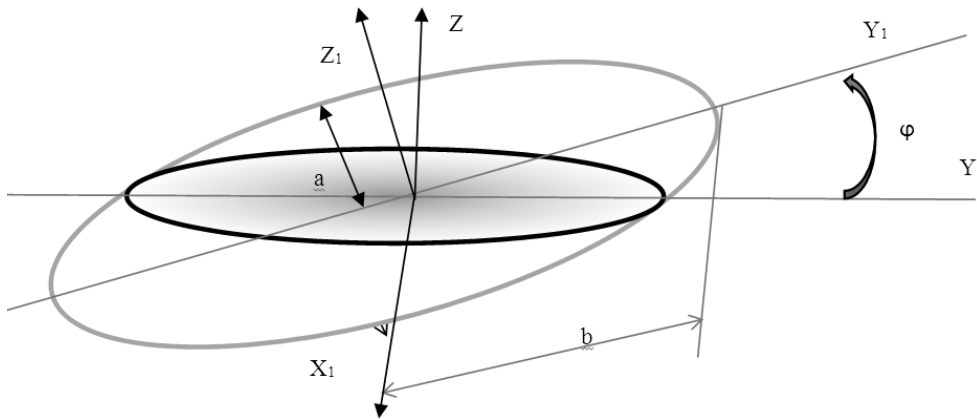


Рис. 2. Схема для визначення площі міделевого перерізу частинки еліпсоїдної форми.

Тоді рівняння поверхні еліпсоїда в канонічній формі набуде вигляду:

$$\frac{X_1^2}{a^2} + \frac{Y_1^2}{b^2} + \frac{Z_1^2}{a^2} = 1. \quad (8)$$

Якщо система координат повернута на кут  $\varphi$  навколо осі  $OY$ , то зв'язок між координатами точок у старій і новій системах координат виразиться формулами:

$$Y_1 = y \cdot \cos \varphi + z \cdot \sin \varphi; \quad Z_1 = z \cdot \cos \varphi - y \cdot \sin \varphi. \quad (9)$$

Підставивши (9) у (8), одержимо рівняння поверхні еліпсоїда у повернутій системі координат:

$$\frac{X^2}{a^2} + \frac{(y \cdot \cos \varphi + z \cdot \sin \varphi)^2}{b^2} + \frac{(z \cdot \cos \varphi - y \cdot \sin \varphi)^2}{a^2} = 1. \quad (10)$$

Врахувавши, що  $z=0$ , одержимо рівняння еліпса:

$$\frac{X^2}{a^2} + y^2 \left( \frac{\cos^2 \varphi}{b^2} + \frac{\sin^2 \varphi}{a^2} \right) = 1 \quad (11)$$

$$\text{з півсями } a \text{ і } b = \frac{ab}{\sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi}}.$$

Беручи до уваги (11), вираз для визначення площі міделевого перерізу буде дорівнювати:

$$A_m = \frac{2b}{\sqrt{a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi}}. \quad (12)$$

Отримавши вираз (12) для визначення міделевої площі і врахувавши (6), можна розрахувати швидкість повітряного потоку, яка б забезпечувала виконання умови (3):

$$V_n = \frac{G}{\pi \cdot K \cdot a^2 b} \sqrt{\frac{(a \cdot F_e \cdot L_e)^2 + (b \cdot G \cdot L_c)^2}{(F_e \cdot L_e)^2 + (G \cdot L_c)^2}}. \quad (13)$$

2. Сила повітряного потоку  $F_n$  менша від сили ваги насінини  $G$ :

$$G > K \cdot V_n \cdot A_m. \quad (14)$$

Ця нерівність виконується при довільному  $\varphi$ , якщо

$$V_n < \frac{G}{K \cdot \pi \cdot a \cdot b}. \quad (15)$$

При цьому насінини буде здійснювати плоскопаралельний рух, який складатиметься з руху центра мас  $C$  та обертального руху навколо нього (рис. 3).

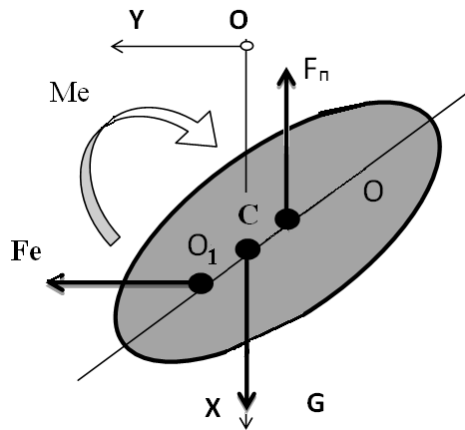


Рис. 3. Схема руху насінини в каналі пневмоелектросепаратора.

Для виявлення умов, за яких можна отримати найбільший ефект розділення, необхідно дослідити геометричні координати частинок насінневої суміші відносно нерухомої системи відліку  $XOY$ , які характеризують їх переміщення вздовж і впоперек каналу.

З цією метою складено диференціальні рівняння руху центра мас насінини з урахуванням її удару до стінки каналу та обертального руху:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dx_c}{dt} = F_e K \frac{dx}{dt} \\ \frac{dy_c}{dt} = m \frac{dy}{dt} \\ I = \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = K(V_n - \frac{dy_c}{dt}) A_1 L_c \cos \varphi - F_e L_e \sin \varphi - \frac{d\varphi}{dt} \cdot K \cdot H + K \frac{dx_c}{dt} L_c \sin \varphi, \end{array} \right. \quad (16)$$

де

$$H = \int_{-L_c}^{L_c} \sqrt{1 - \frac{v^2 D^2}{B}} dy = \frac{\pi b^2}{4} (L_c^2 + B)$$

Отримавши розв'язки рівнянь (16), можна знайти координати руху частинок насінневої суміші як функції часу. У даному випадку для виявлення умов, за яких можна отримати найбільший ефект розділення в пневмоелектросепараторі, необхідно дослідити координату  $y_c$ , яка характеризує переміщення частинок уздовж його каналу. Розділення проходитиме найефективніше в умовах, за яких координата  $y_c$  для одного компонента набуває додатного значення (виноситься вгору), а для іншого – від'ємного (падатиме вниз).

З аналізу рівнянь (16) можна стверджувати, що на її значення найбільше впливає площа міделевого перерізу сепарувальних частинок, яка сприймає дію повітряного потоку. Ця площа суттєво залежить від електричних властивостей насінневої частинки, оскільки електричне поле, яке створюється між пластинами пневмоелектричного каналу, орієнтує їх уздовж силових ліній.

Для детального вивчення поведінки частинок у вигляді еліпсоїда було розроблено їх моделі, які відображають реальні насінини, а саме: якісної культури  $M_1 (f(m_1, a_1, b_1, L_e, L_c) \text{ при } L_e > L_c > 0)$ ; неякісної культури без зародка  $M_2 (f(m_2, a_2, b_2, L_e, L_c) \text{ при } L_e = L_c = 0)$ ; неякісної бур'яну  $M_3 (f(m_3, a_3, b_3, L_{e1}, L_{c1}) \text{ при } L_e > L_c > 0)$ ; якісної бур'яну  $M_4 (f(m_4, a_4, b_4, L_{e4}, L_{c4}))$ .

Систему диференціальних рівнянь проінтегрували за таких початкових умов:

$$t = 0, x = 0, y = 0, z = 0, v = 0$$

$$\frac{dy}{dt} = \frac{dx}{dt} = \frac{dz}{dt} = 0 \quad (17)$$

Розв'язавши систему рівнянь (16) чисельним методом та реалізувавши в програмному середовищі MATLAB, отримано значення траєкторії руху частинок насінневої суміші, які дозволяють здійснювати аналіз впливу на них регульованих факторів – швидкості повітряного потоку  $V_n$  (рис. 4) та сили електростатичного поля  $F_e$  (рис. 5).

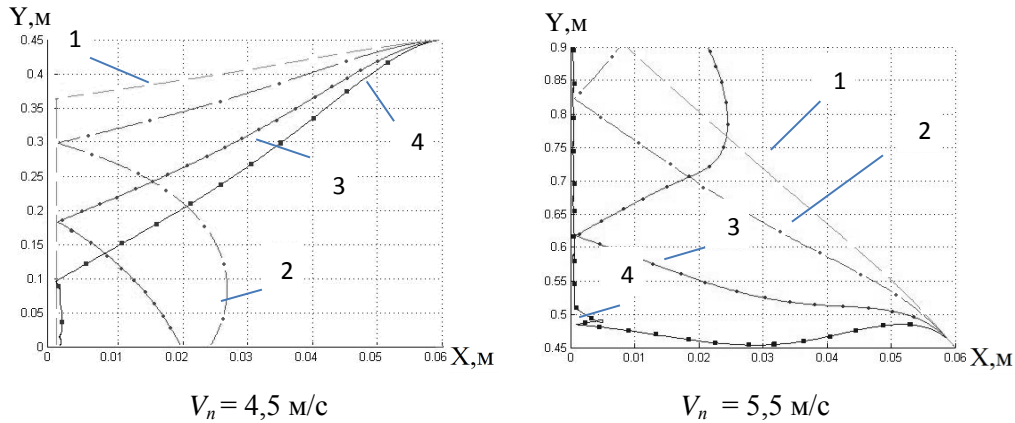


Рис. 4. Вплив на розрахункові траєкторії руху частинок насінневих сумішей швидкості повітряного потоку  $V_n$ : 1 –  $M_1$ ; 2 –  $M_2$ ; 3 –  $M_3$ ; 4 –  $M_4$  ( $E = F_e = 0$ ).

Проаналізувавши розрахункові графічні залежності траєкторії польоту досліджуваних насінин, відображених моделями  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ ,  $M_4$ , встановлено наступне. За відсутності електричного поля між провідними пластинами вертикального каналу ( $E=0$ ) і швидкості повітряного потоку  $V_n=4,5$  м/с всі частинки рухаються вниз, що унеможливило їх розділення. Проте після збільшення швидкості потоку до  $V_n = 5,5$  м/с спостерігається протилежна картина – усі вони переміщуються вгору.

У такому разі можна стверджувати, що за вищезазначених умов не можна досягти ефективного розділення якісних насінин, відображених  $M_1$ , від усіх інших – бур'янів ( $M_4$ ) і біологічно неповноцінних без зародків ( $M_2$  і  $M_3$ ).

На траєкторію руху сепарувальних частинок суттєвий вплив має напруженість електростатичного поля  $E$  між електропровідними пластинами вертикального каналу, яка викликає дію на них електричної сили  $F_e$ . Підтвердженням цього є розрахункові траєкторії досліджуваних частинок (див. рис. 5).

З аналізу зображених на рис. 5 траєкторій можна зробити висновок, що за сили електростатичного поля  $F_e = 1 \cdot 10^{-6}$  Н та швидкості повітряного потоку  $V_n = 5$  м/с групи досліджуваних насінин по-різному рухаються в каналі пневмоелектросепаратора.

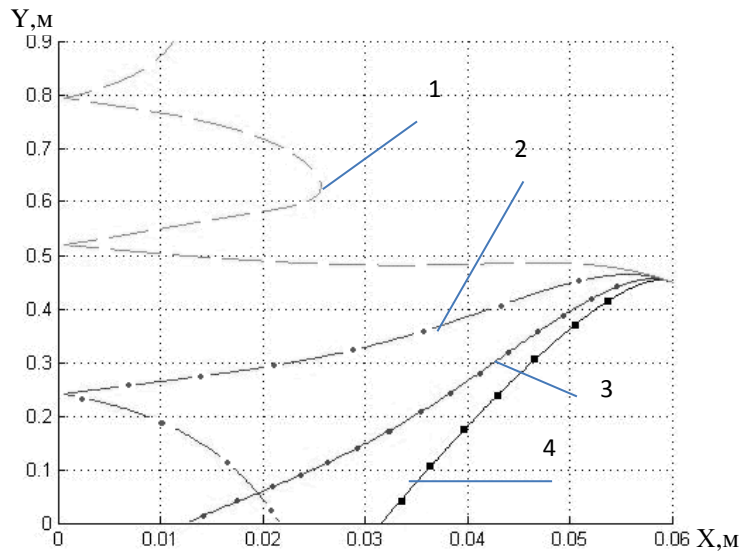


Рис. 5. Розрахункові траєкторії руху насінин сили за умови дії сили електростатичного поля  $F_e = 1 \cdot 10^{-6}$  Н і повітряного потоку  $V_n = 5$  м/с;  
1 –  $M_1$ ; 2 –  $M_2$ ; 3 –  $M_3$ ; 4 –  $M_4$ .

Якісні насінини культури, представлені моделлю  $M_1$ , переміщуються вгору, а всі інші – насінини без зародків  $M_2$  і  $M_3$  та важковідділюваних бур'янів  $M_4$  – рухаються вниз. Це є підтвердженням того, що за оптимальних значень основних регульованих параметрів пневмоелектросепарування – швидкості повітряного потоку та напруженості електричного поля, яка викликає дію електростатичної сили  $F_e$ , можна домогтися якісного відділення від насінин культури важковідділюваних домішок засмічувачів та різноманітних неякісних, біологічно неповноцінних насінин.

**Висновки.** 1. Завдяки врахуванню сукупної дії на насінини еліпсоїдної форми гравітаційних, електричних сил та сили повітряного потоку отримано диференціальні рівняння, які відображають математичну модель їх руху в каналі пневмоелектричного сепаратора.

2. Розроблена математична модель поведінки частинок компонентів насінневої суміші дає змогу в будь-який момент часу розрахувати координати траєкторії руху, на підставі аналізу яких можна робити висновок про можливість їх розділення у вертикальному пневмоелектричному каналі.

3. Виявлено, що найсуттєвіший вплив на поведінку сепарувальних частинок мають регульовані параметри пневмоелектросепарування – швидкість повітряного потоку в каналі  $V_n$  та напруженість електричного поля  $E$  між встановленими в ньому провідними пластинами, яка викликає дію на них електростатичної сили. На підставі теоретичних досліджень їх впливу на траєкторії руху можна оптимізувати значення цих регульованих параметрів, за яких найефективніше проходитиме



розділення сепарувальної суміші, до складу якої входять частинки еліпсоїдної форми.

#### Бібліографічний список

1. Антонів С. Ф. Насінництво злакових трав / С. Ф. Антонів // Насінництво. – 2005. – № 11. – С. 7-18.
2. Бакум М. В. Дослідження впливу основних параметрів пневматичного сепаратора на якість очищення насіння редиски / М. В. Бакум, М. М. Крекот // Сільськогосподарські машини : зб. наук. ст. – Луцьк : ЛНТУ, 2009. – Вип. 18. – С. 14-19.
3. Бакум М. В. Дослідження руху часток в квазігоризонтальному каналі пневматичних сепараторів / М. В. Бакум, В. П. Ольшанський, М. М. Крекот // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка : Технічні системи і технології тваринництва. – 2009. – Вип. 132 – С. 7.
4. Боженко А. І. Сучасні технології виробництва насіння багаторічних трав / А. І. Боженко // Посібник українського хлібороба. – 2012. – С. 156-161.
5. Дадак В. О. Підвищення ефективності пневмосепарування насіння кормових трав / В. О. Дадак // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка : Технічні системи і технології рослинництва. – 2014. – Вип. 144. – С. 225-232.
6. Дослідження траєкторії домішок в повітряному потоці / М. М. Петренко, В. А. Онопа, О. А. Кислун, В. В. Онопа. – Кіровоград : Кіровоград. нац. техн. ун-т, 2009. – № 2. – С. 5.
7. Єрмак В. П. Обґрунтування способу сепарування соняшника у повітряних потоках : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / В. П. Єрмак. – Луганськ, 2003. – 21 с.
8. Зюлин А. Н. Интенсификация процесса сепарации зерна в пневмоканалах с восходящим воздушным потоком / Зюлин А. Н. // Вестник МГАУ им. В. П. Горячкина. – 2005. – № 4. – С. 56-59.
9. Мачнев А. В. Движение семени при ударе о поверхность распределителя семян / А. В. Мачнев // Техника в сельском хозяйстве. – 2005. – № 4. – С. 32-38.
10. Насіння овочевих, баштанних, кормових і пряно-ароматичних культур. Сортові та посівні якості. Технічні умови : ДСТУ 7160:2010. – [Чинний від 2010-07-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2010. – 19 с. – (Національний стандарт України).
11. Оцінка та виявлення нових ознак подільності дрібнонасінневих сумішей сільськогосподарських культур / С. Ковалишин, В. Паранюк, В. Дадак, В. Соколюк // Motrol: Motorization and power industry in agriculture. – Lublin : Commision of motorization and power industry in agriculture, 2012. – Vol. 14D. – P. 95-103.
12. Петриченко В. Ф. Технології вирощування бобових і злакових трав на насіння / В. Ф. Петриченко, С. Ф. Антонів, В. Д. Бугайов. – К., 2005. – 52 с.
13. Совершенствование конструкции канала второй аспирации / [Тарасенко А. П., Орбинский В. И., Гиевский А. М., Суднеев А. А.] // Техника в сельском хозяйстве. – 2009. – № 2. – С. 29-31.
14. Туров А. К. Моделирование поля скоростей воздушного потока в пневмовинтовом канале / А. К. Туров, А. А. Мезенов, Е. А. Пшенов // Техника в сельском хозяйстве. – 2013. – № 2. – С. 36-40.
15. Хамуев В. Г. Сравнительная оценка качества разделения зернового материала пневмосепарирующими устройствами / Хамуев В. Г. // Техника в сельском хозяйстве. – 2008. – № 5. – С. 23-26.

**Ковалишин С., Ніщенко І., Ковальчик Ю., Дадак В. Теоретичне дослідження розділення дрібнонасіненних сумішей у пневмоелектричному каналі**

Розглянуто під дією гравітаційних, електричних сил та сили повітряного потоку поведінку еліпсоїдних насінин у каналі пневмоелектричного сепаратора. Отримано диференціальні рівняння, завдяки яким можна визначити координати траєкторії їх руху. Досліджено вплив на поведінку досліджуваних частинок основних регульованих параметрів пневмоелектросепарування – швидкості повітряного потоку та напруженості електростатичного поля між електропровідними пластинами вертикального каналу.

**Ключові слова:** дрібнонасіненні суміші, частинки еліпсоїдної форми, пневмоелектричний канал, моделювання.

**Kovalyshyn S., Nischenko I., Kovalchik Yu., Dadak V. Theoretical studies of small seed mixtures separation in pneumo-electrical separator**

The action of an ellipsoid-shaped seed, under the influence of gravity, electrical power and airflow in pneumo-electrical separator channel is considered. The differential equation to help you determine the coordinates of the trajectory of their movement are worked out. The effect on the behavior of particles of the basic setting options of pneumo-separation – airflow speed and tension of electrostatic field between the conductive plates of the vertical channel is investigated.

**Key words:** small seed mixtures, ellipsoid shape particles, pneumo-electrical channel, modeling.

**Ковалишин С., Нищенко И., Ковальчик Ю., Дадак В. Теоретическое исследование разделения мелкосеменных смесей в пневмоэлектрическом канале**

Рассмотрено под действием гравитационных, электрических сил и силы воздушного потока поведение эллипсоидных семян в канале пневмоэлектрического сепаратора. Получены дифференциальные уравнения, позволяющие определить координаты траектории их движения. Исследовано влияние на поведение исследуемых частиц основных регулируемых параметров пневмоэлектросепарирования – скорости воздушного потока и напряженности электрического поля между электропроводящими пластинами вертикального канала.

**Ключевые слова:** мелкосеменные смеси, частицы эллипсоидной формы, пневмоэлектрический канал, моделирование.