

a primary condition for the transition to a new level of management and the survival of the agricultural production industry in a difficult time for the country.

For a comparative analysis of energy efficiency, the most used models of self-propelled sprayers and agricultural drones in Ukraine were selected. The functional and technological capabilities of agricultural drones in comparison with ground sprayers are analyzed. A comparison of the technological process of spraying with self-propelled sprayers and agricultural drones revealed a number of advantages of unmanned aerial vehicles. The specific fuel consumption of both sprayers was determined, so the specific consumption of New Holland is equal to 0.44 l/ha, and that of Tecnomax is 0.5 l/ha. The specific energy consumption of agricultural drones was determined, so the specific energy consumption of the LOVOL LJ16L-606 is 0.41 kW/ha, and the DJI AGRAS T30 is 0.31 kW/ha. To compare the specific energy consumption of self-propelled and unmanned units in monetary terms, it was established that for the New Holland GUARDIAN 275F self-propelled sprayer this indicator is 25.0 UAH/ha, for the Tecnomax LASER4240 self-propelled sprayer it is 22.0 UAH/ha, and for agricultural drones it is 7.6 UAH/ha and 5.7 UAH/ha for LOVOL LJ16L-606 and DJI AGRAS T30, respectively.

Therefore, the use of agricultural drones for the system of precision farming in agricultural production is not only a modern technology that provides the opportunity to apply technological materials during the entire growing season of plants, but is also more ecological and economical than when using self-propelled sprayers.

precision agriculture, geographic information system, agricultural drones, crop spraying, specific energy consumption, effectiveness

Одержано (Received) 18.09.2023

Прорецензовано (Reviewed) 04.10.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023

УДК631.362

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2023.53.138-148>

С. П. Степаненко, д-р техн. наук, ст. наук. співр., **Д. А. Волик**, мол. наук. співр.

Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва, Національної академії аграрних наук України, Глеваха, Україна

e-mail: stepanenko_s@ukr.net

Математичне моделювання та результати експериментальних досліджень процесу вібропневмоімпульсного поділу насіння за густиною

Наведено результати математичного моделювання руху зернового матеріалу на поверхні безпровального решета вібропневмоімпульсного сепаратора. Використана силова та кінематична модель, геометричні характеристики поверхні безпровального решета вібропневмоімпульсного сепаратора в динаміці з кінематичними показниками обробки. Розрахунки за запропонованою моделлю дозволяють визначати траєкторії переміщення, швидкості та прискорення насінин зернового середовища при сукупній дії на них вібрацій та пневмоімпульсного потоку.

В результаті проведених наукових досліджень та аналізу створюваних сил за розробленою математичною моделлю встановлено: найбільший вплив на процес переміщення зернового матеріалу, як в горизонтальному так і у вертикальному напрямку надає сила імпульсу (пульсацій) повітряного потоку, сила тиску вище лежачих шарів зернового матеріалу (для насінин у середній частині та на поверхні безпровального решета), сили тертя, ваги насінини та архімедова сила. Тому з метою інтенсифікації процесу фракціонування зернового середовища, збільшення питомої продуктивності вібропневмоімпульсного сепаратора необхідно підвищити силу пульсуючого повітряного потоку, сили інерції коливального руху, тертя та бічний тиск на насінини в зерновому середовищі.

насіння, густина, питома навантаження, диференціальні рівняння, швидкість переміщення насіння, експериментальні дослідження, макетний зразок

Постановка проблеми. Рух матеріалу у зернотранспортних системах на різних типах поверхонь (наприклад, на живильниках, лопатях у барабанах і мішалках, віброситах та обертових розкидачах) є загальнопоширеним явищем у техніці для подальшої обробки зерна після його збирання [1-2].

Основою теорії руху частинок по шорстких поверхнях є диференціальні рівняння для переміщення частинок, які діють під впливом сили тяжіння, сухого тертя та опору повітря (середовища)[3, 9, 13]. Тому при розробці нових конструкцій машин і обладнання для підвищення їх питомої продуктивності важливо мати математичні моделі, які належним чином описують процес переміщення зерна з урахуванням всіх активних сил в зерновому середовищі[4, 6-8].

Якість технологічних процесів, пов'язаних з транспортуванням зерна на опорних поверхнях, залежить від конструкційних параметрів і режимів роботи робочих органів, таких як швидкість переміщення матеріалу, тривалість контакту з поверхнею, швидкість руху та інші показники[10, 12, 18].

Неоднозначність у виборі математичних формул та механіко-математичних моделей, які враховують зовнішні та внутрішні сили та визначають коефіцієнт опору, ускладнює використання наявних аналітичних залежностей для розрахунку швидкості і шляху переміщення зерна в зерновому середовищі[5, 11, 17]. Використання коефіцієнта вітрильності як коефіцієнта опору та коефіцієнта динамічної в'язкості зернового середовища не є належно обґрунтованим. Тому для кожної математичної моделі руху частинки по поверхні необхідно визначати коефіцієнти в диференціальних рівняннях на основі експериментальних даних і оцінювати відповідність моделі реальному процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для отримання якісного врожаю з одночасним збільшенням валового надходження на зерноочисні комплекси та мінімізацією посівних норм насіння необхідно забезпечити висів сільськогосподарськими матеріалами - насінням, яке буде відповідати найвищим стандартам до фізико-механічних властивостей насіння. Для забезпечення даних властивостей посівного матеріалу, безперечно, необхідно виконання послідовних технологічних операцій, які пов'язані з попереднім очищенням та сушінням зібраного комбайном засміченого зернового матеріалу, провести його безпосереднє доочищення на комбінованих зерноочисних технічних засобах, трієрах та вібропневматичних сортувальних столах. Слід відмітити, що дослідження впливу на зернівку у вібропневмозрідженому шарі матеріалу з підведенням додаткових збурюючих сил, типу пульсуючого повітряного потоку в більшості випадків не проводиться, а ті дослідження які проведені авторами [3-4], щодо впливу на зернове середовище обмежуються досить значними припущеннями, які не відображають реальність перебігу процесу вібропневмозрідження шару зернового матеріалу [9, 12, 13]. Основними недоліками, які слід відмітити, для використання даних технічних засобів є потреба у висококваліфікованих працівниках для раціонального налаштування досить складних за своєю будовою машин (вібростолів, вібропневматичних столів, вібропневмосепараторів тощо), значна питома енергоємність даних технічних засобів у порівнянні з більш простими для використання решітними та пневморешітними технічними засобами та трієрами.

Дослідженнями та модернізацією конструкцій вібропневмосортувальних столів займалося значна кількість відомих вчених [1, 8-10, 13, 17, 18], як в Україні, так і за кордоном [14]. Нижче у таблиця 1 наведено перелік існуючих технічних засобів та їх технологічні і енергетичні характеристики. Аналіз даних характеристик, щодо продуктивності вібропневмостолів вітчизняного виробництва становить від 1,0 до 6,0

т/год, питоме навантаження на деку (безпровальне решето) коливається в межах 0,83–3,20 т/год·м², їхня питома енергоємність становить 1,83–4,75 кВт·год/т. Машини фірми «Cimbria» (Данія) мають питоме навантаження на деку 2,63–3,53 т/год·м² та питому енергоємність у межах 1,79–5,50 кВт·год/т, слід відмітити що для даних технічних засобів з продуктивністю до 1,5 т/год цей показник становить 5,50 кВт·год/т

Пневмостоли фірми «Петкус» (Німеччина) з продуктивністю 1,5 т/год мають питоме навантаження на деку 0,64 т/год·м², а їх питома енергоємність становить 5,5 кВт/год.

На базі проведеного короткого аналізу технічних засобів для поділу насінневого матеріалу за густиною зернівок, або комплексом фізико-механічних властивостей постає питання, щодо модернізації існуючих і розроблення нових машин, які забезпечать розділення насінневого матеріалу за комплексом властивостей, у тому числі, густиною, з одночасним зменшенням питомої енергоємності, за незмінних умов показників якості розділення, тому вирішення даної проблеми є досить актуальним та своєчасним.

Постановка завдання. Метою роботи є обґрунтування параметрів і режимів процесу поділу насіння пшениці за густиною насінин у вібропневмоімпульсному зерновому середовищі на технічному засобі з вдосконаленою конструкцією.

Виклад основного матеріалу. Аналітичні дослідження процесу поділу насіння пшениці за густиною насінин у вібропневмоімпульсному зерновому середовищі проведені з використанням методів динаміки і класичної механіки, а лабораторні дослідження виконані на установці для поділу насіння за густиною насінин у вібропневмоімпульсному зерновому середовищі, яка розроблена у відділі механіко-технологічних проблем збирання і післязбиральної обробки урожаю зернових та олійних культур ІМА АПВ [5, 17] з використанням методик однофакторного та багатфакторного експерименту. В якості насіння основної культури використовували насіння пшениці врожаю 2022 року за наступних значень: вологи 12,8% вихідного матеріалу, що пройшов попереднє очищення, основне очищення на повморешітній машині, та має об'ємну масу 656 г/дм³ – для важких насінин та об'ємну масу 450 г/дм³ – для відносно легких насінин.

Поставлені завдання вирішували проведенням 1-но та 2-факторного експерименту. В процесі лабораторних досліджень змінювали частоту коливань деки, кут її нахилу до горизонту та частоту пульсацій повітряного потоку, яке подавалось під деку (безпровальне решето). При проведенні лабораторних досліджень налаштовували значення подачі зернового матеріалу в межах 750–850 кг/год, а також використовували наступне лабораторне обладнання: термогігроанемометр для визначення швидкості повітряного потоку над поверхнею деки в межах 0–3.6 м/с, частотний регулятор - для зміни частоти коливань деки в діапазоні 3–10 Гц і кутмір - для встановлення кута нахилу деки. Функцією оптимізації роботи технічного засобу обрали: ступінь розділення насіння за густиною та втрати насіння (тобто потрапляння насінин з більшою (меншою) їх густиною у відбірники I, II фракцій).

На насінину у зерновому середовищі, яка рухається по поверхні безпровального решета з поздовжнім кутом нахилу, під дією її коливань і пульсуючого повітряного потоку діють сили, які представлені на рис. 1 і 2.

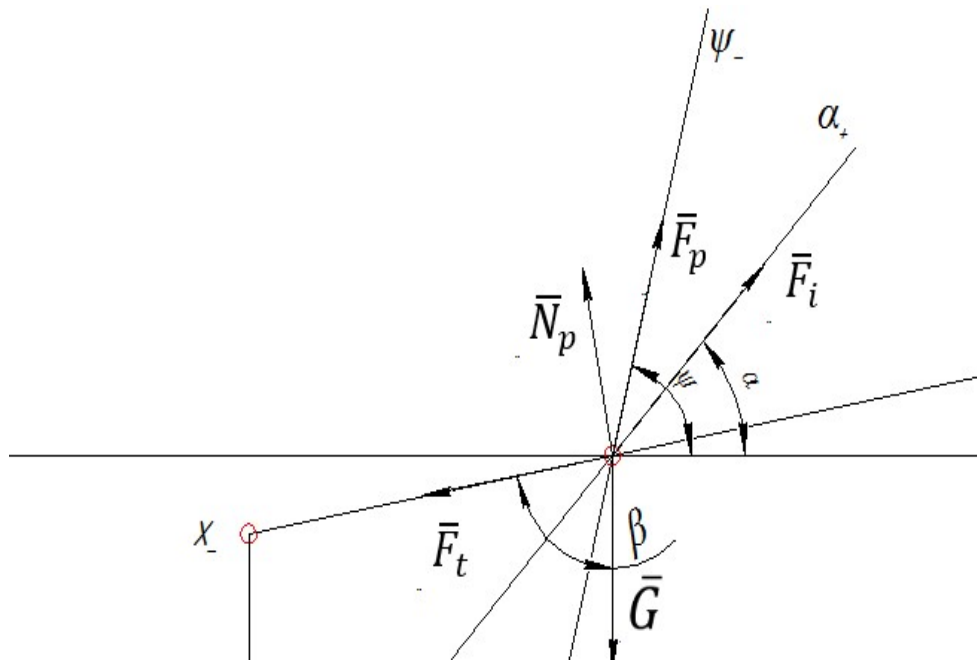


Рисунок 1 – Схема сил, що діють на насінину зернового середовища, яка рухається по поверхні безпровального решета (рух співпадає з напрямом сили інерції)

Джерело: розроблено авторами

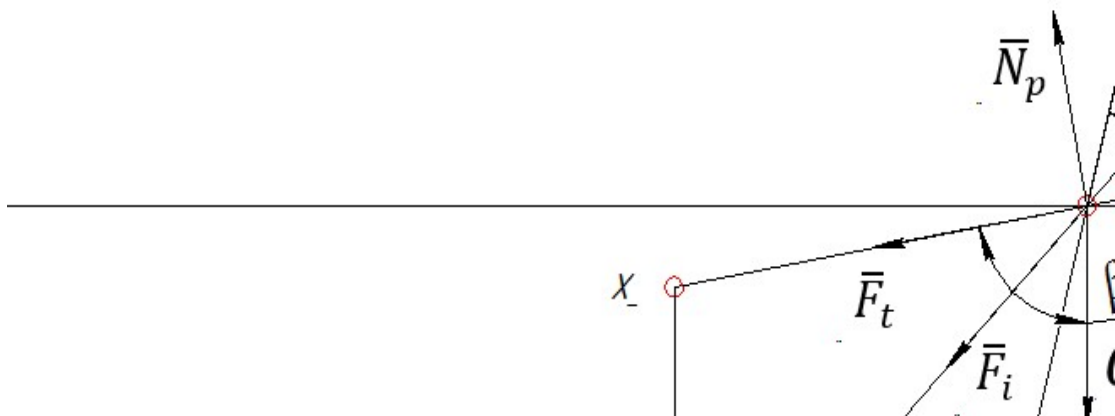


Рисунок 2 – Схема сил, що діють на насінину зернового середовища, яка рухається на поверхні безпровального решета (рух протилежний з напрямом сили інерції)

Джерело: розроблено авторами

Відповідно до рис. 1. та рис. 2 диференціальні рівняння руху насінини для різних інтервалів набудуть наступного вигляду:

$$m \cdot \frac{d^2 x_{(+)} }{dt^2} = F_i \cdot \cos(\alpha - \beta) - m \cdot g \cdot \sin(\beta) - F_t + F_p \cdot \cos(\psi - \beta) \quad (1)$$

де m – маса насінини;

$\frac{d^2x}{dt^2}$ –

прискорення;

F_i – сила інерції;

α – кут спрямованості коливань;

β – кут нахилу поверхні деки;

γ – кут тертя матеріалу по поверхні деки;

g – прискорення вільного падіння;

F_p – сила опору повітряного потоку;

ψ – кут спрямованості повітряного потоку;

N_p – сила, що діє перпендикулярно поверхні деки (реакція опори);

F_t – сила тертя.

Після нескладних математичних перетворень рівняння (1), отримаємо:

$$\frac{d^2x_{(+)}(t)}{dt^2} \cdot \frac{\cos(\gamma)}{\cos(\alpha - \beta - \gamma)} = \omega^2 \cdot R \cdot \cos(\omega \cdot t) - g \cdot \frac{\sin(\beta + \gamma)}{\cos(\alpha - \beta - \gamma)} + k_p \cdot V_{pn} \cdot \sin t \cdot \cos \beta \quad (2)$$

де k_p – коефіцієнт вітрильності, m^{-1} , [3, 5];

V_{pn} – швидкість витання насіння пшениці, м/с;

$S_n = \frac{\pi d^2}{4}$ – площа діелевого перетину зернівки;

$d = 2 \cdot r$ – діаметр кульової зернівки, м;

ρ_{\square} – густина повітря, kg/m^3 ;

$\xi(Re)$ – коефіцієнт аеродинамічного опору, який залежить від критерія

Рейнольдса $Re = \frac{du}{\nu}$ [1];

ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, m^2/c ;

u – швидкість обтікання частинки, м/с;

V_{pn} – швидкість повітряного потоку, м/с;

ω – частота коливань безпровального решета, Гц;

ω_1 – частота коливань пульсуючого повітряного потоку, Гц;

R – радіус кривошипа, м.

$$m \cdot \frac{d^2x_{(-)}}{dt^2} = F_t - F_i \cdot \cos(\alpha - \beta) - m \cdot g \cdot \sin(\beta) + F_p \cdot \cos(\psi - \beta) \quad (3)$$

Після відповідних перетворень, рівняння (3) набуде наступного вигляду:

$$+k \cdot V_{pn} \cdot [1 - \sin(\omega_1 \cdot t)] \cdot \cos \beta$$

$$\frac{d^2 x_{(-)}}{dt^2} \cdot \frac{\cos(\gamma)}{\cos(\alpha - \beta + \gamma)} = \omega^2 \cdot R \cdot \cos(\omega \cdot t) - g \cdot \frac{\sin(\beta - \gamma)}{\cos(\alpha - \beta + \gamma)} +$$

Введемо позначення:

$$\lambda = \frac{\cos(\alpha - \beta + \gamma)}{\cos(\gamma)} \quad (5)$$

$$\xi = \frac{\cos(\alpha - \beta - \gamma)}{\cos(\gamma)} \quad (6)$$

Тоді значення рівнянь (2) та (4) з відповідним урахуванням виразів (5) та (6) набудуть наступного вигляду:

$$\begin{aligned} \rightarrow \frac{d^2 x_{(+)} \cdot \frac{1}{\xi}}{dt^2} &= \omega^2 \cdot R \cdot \cos(\omega \cdot t) - g \cdot \frac{\sin(\beta + \gamma)}{\cos(\alpha - \beta - \gamma)} + \\ +k \cdot V_{pn} \cdot [1 - \sin(\omega_1 \cdot t)] \cdot \cos \beta & \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \rightarrow \frac{d^2 x_{(-)} \cdot \frac{1}{\lambda}}{dt^2} &= \omega^2 \cdot R \cdot \cos(\omega \cdot t) - g \cdot \frac{\sin(\beta + \gamma)}{\cos(\alpha - \beta - \gamma)} - \\ \rightarrow -k_p \cdot (V_{pn} \cdot [1 - \sin(\omega_1 \cdot t)])^2 \cdot \cos(\psi - \beta) & \end{aligned} \quad (8)$$

Проінтегрувавши рівняння (7) і (8) та отримавши рівняння переміщення руху насінини по поверхні безпровального решета, яка піддається пульсуючому повітряному потоку, можливо встановити значення величини переміщення та швидкості насінин V_s по поверхні:

$$\rightarrow V_s = \frac{x_{(+)} + x_{(-)}}{T} \quad (9)$$

де $x_{(+)}, x_{(-)}$ – переміщення насінин матеріалу зернового середовища, відповідно, вгору та вниз за період T коливань.

Розрахунки проводили за наступних початкових умов: кут нахилу поверхні деки $\beta = 10^\circ; 12^\circ; 14^\circ; 16^\circ$; та $\alpha = 12^\circ; 14^\circ; 16^\circ; 18^\circ$; кут тертя насінинна поверхні деки $\gamma = 30^\circ$; радіус кривошипу $R = 0,005$ м; коефіцієнт вітрильності насінин, швидкості повітряного потоку $V_{pn} = 0 - 3,6$ м/с, частоті коливань деки $\omega = 10 - 20$ Гц; частоті пульсацій повітряного потоку $\omega_1 = 10 - 20$ Гц (таблиця 1).

Таблиця 1 – Розрахункові величини середніх швидкостей руху насінин по безпровальній поверхні деки

V_{pn} , м/с	V_s , мм/с	$x(+)$, мм	$x(-)$, мм	β	ψ	α	γ_{\square}	ω	ω_1
0	29	0.07	2.7	10	0	12	30	10	10
1,2	29	0.2231	2.636		15				
2,4	29	0.87	2.014		30				
3,6	29	2.194	0.742		45				
0	18	0.022	0.857	12	0	14		20	15
1,2	18	0.1514	0.7333		15				
2,4	18	0.72	0.18		30				
3,6	18	1.9	-0.96		45				
0	24	0.038	1.429	14	0	16		15	20
1,2	25	0.159	1.312		15				
2,4	25	0.07161	0.07776		30				
3,6	26	1.893	-0.03528		45				
0	19	0.0246	0.908	16	0	18		20	20
1,2	19	0.1384	0.7981		15				
2,4	19	0.6789	0.279		30				
3,6	20	1.8	-0.8382		45				

Джерело: розроблено авторами

Графічні залежності зміни середніх значень швидкостей насінин від частоти коливань поверхні та частоти пульсацій повітряного потоку наведені на рис. 3.

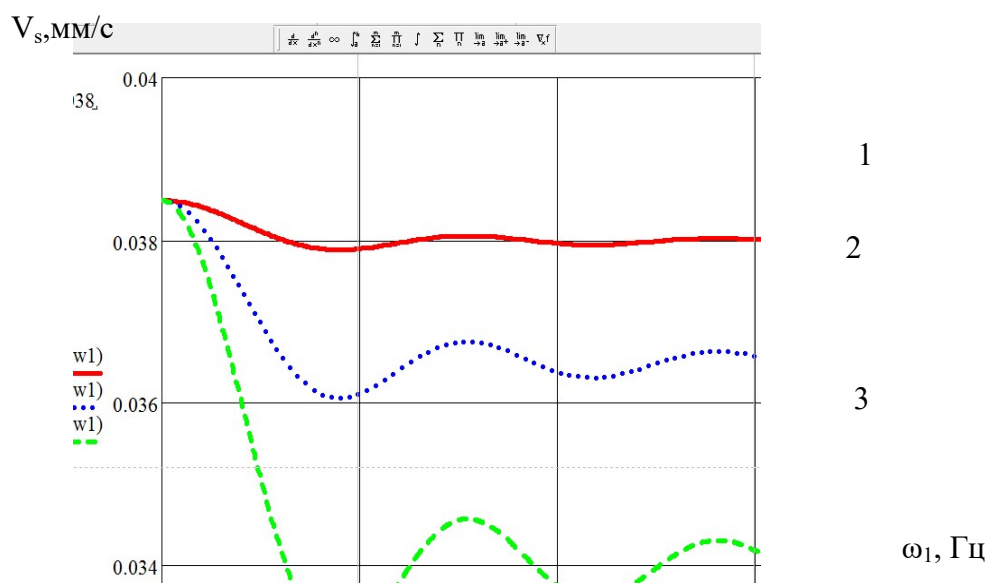


Рисунок 3 – Закономірності зміни середніх значень швидкостей насінин на деці, залежно від частоти коливань поверхні деки при різних значеннях швидкості вхідного повітряного потоку V_{pn}

Джерело: розроблено авторами

З аналізу графічних залежностей, наведених на рис. 3 встановлено, що швидкість руху насінини по деці збільшується з підвищенням частоти коливань деки та частоти пульсації повітряного потоку у вказаному інтервалі.

В результаті проведення лабораторних досліджень згідно з матрицею, яка наведена в таблиці 2, встановлені середні значення ступеня поділу насіння пшениці за їх густиною і втрат повноцінного насіння основної культури у відході.

Таблиця 2 –Матриця експерименту, рівні варіювання факторів та результати лабораторних досліджень

№ досліджу	Фактори		Середнє значення ступеня поділу насіння пшениці, Y_1 %
	Частота коливань деки, x_1 Гц	Частота пульсації повітряного потоку, x_2 , Гц	
1	10	10	68,6
2	15	10	77,1
3	20	10	80,0
4	10	15	82,9
5	15	15	85,7
6	20	15	88,6
7	10	20	77,1
8	15	20	82,9
9	20	20	85,7

Джерело: розроблено авторами

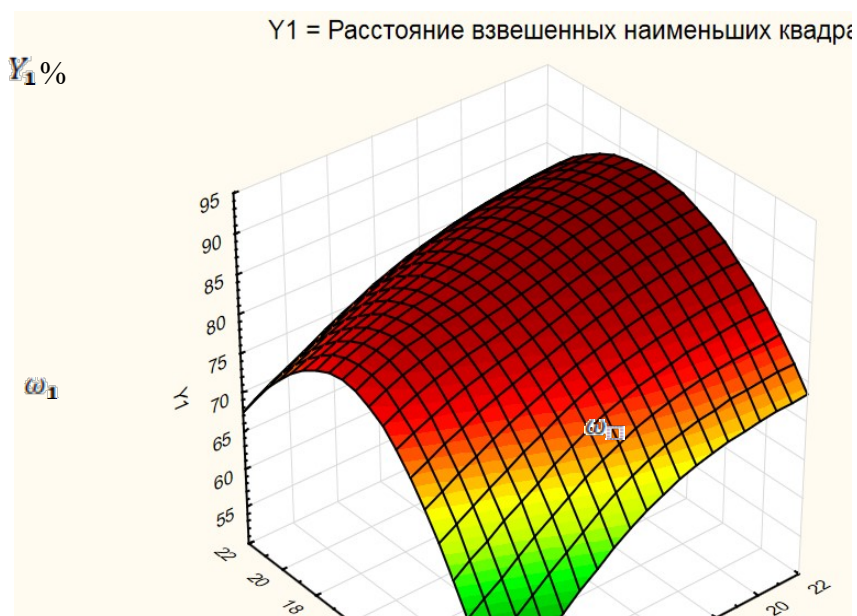


Рисунок 4 – Вплив частоти коливань деки ω_1 та частоти пульсації ω_2 повітряного потоку на ступінь поділу насіння пшениці

Джерело: розроблено авторами

Після обробки отриманих лабораторних даних отримали рівняння регресії:

$$Y_1 = 87,47 + 5,32 \cdot x_1 + 2,88 \cdot x_2 - 1,66 \cdot x_1^2 - 0,54 \cdot x_1 \cdot x_2 - 6,67 \cdot x_2^2 \quad (10)$$

На рис. 4 наведено вплив частоти коливань деки та кута її нахилу на ступінь поділу насіння пшениці.

З отриманих графічних залежностей можна зробити висновок про те, що раціональними параметрами і режимами процесу поділу насіння пшениці є: значення частоти коливань деки 18-20 Гц, частота пульсації повітряного потоку – 14-16 Гц.

Висновки. В результаті проведених досліджень встановлені раціональні значення параметрів технічного засобу для поділу насіння пшениці за їх густиною у вібропневмоімпульсному шарі зернового середовища: значення частоти коливань деки 18-20 Гц, частота пульсації повітряного потоку – 14-16 Гц.

За визначених раціональних значень конструкційно-кінематичних параметрів технічного засобу для поділу насіння за густиною, максимальне середнє значення ступеня поділу насіння пшениці збільшується на 2025%.

Список літератури

1. Котов Б. І., Степаненко С. П. Основи теорії та технології повітряної сепарації зернових матеріалів : монографія. Київ : ЦП Компринт, 2023. 427 с.
2. 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*. 2020. № 50. С. 122–123.
3. Ребот Д. П., Топільницький В. Г. Математична модель руху сипкого матеріалу у вібраційному сепараторі. *Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні*. 2022. № 56. С. 67–74.
4. Ребот Д. П., Топільницький В. Г. Математичне моделювання взаємовпливу динамічних характеристик сипкої сировини у процесі вібраційної сепарації. *Scientific Bulletin of UNFU*. 2021. Т. 31, № 2. С. 88–92. <https://doi.org/10.36930/40310214>
5. Степаненко С. П., Котов Б. І., Калініченко Р. А. Дослідження руху частинок зернового матеріалу у вертикальному каналі за умов дії пульсації повітряного потоку. *Сільськогосподарські машини*. 2021. № 47. С. 25–36. <https://doi.org/10.36910/acm.vi47.619>
6. Analytical assessment of the pneumatic separation quality in the process of grain multilayer feeding. INMATEH / A. Nesterenko et al. *Agricultural Engineering*. 2017. No. 53(3). P. 65–70.
7. Energy Assessment of the Pneumatic Sieve Separator for Agricultural Crops / Y. Mykhailov et al. *Agricultural Engineering*. 2021. Vol. 25, no. 1. P. 147–156. <https://doi.org/10.2478/agriceng-2021-0012>
8. Experimental study of the process of grain cleaning in a vibro-pneumatic resistant separator with passive weeders / I. Rogovskii et al. *Series II: Forestry Wood Industry Agricultural Food Engineering*. 2020. Vol. 13(62), no. 1. P. 117–128. <https://doi.org/10.31926/but.fwiafe.2020.13.62.1.11>
9. Identification of a mixture of grain particle velocity through the holes of the vibrating sieves grain separators / L. Tishchenko et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 2, no. 7(80). P. 63. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65920>
10. Improvement of the sunflower seed separation process efficiency on the vibrating surface / E. Aliiev et al. *Acta Periodica Technologica*. 2019. No. 50. P. 12–22. <https://doi.org/10.2298/apt1950012a>
11. Improving the efficiency of harvesting sunflower seed crops / S. Stepanenko et al. *INMATEH Agricultural Engineering*. 2022. P. 331–340. <https://doi.org/10.35633/inmateh-67-34>
12. Improving the mechanical-mathematical model of pneumatic vibration centrifugal fractionation of grain materials based on their density / V. Bredykhin et al. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 4, no. 1(112). P. 54–60. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.236938>
13. Modeling of Aerodynamic Separation of Preliminarily Stratified Grain Mixture in Vertical Pneumatic Separation Duct / S. Kharchenko et al. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 10. P. 4383. <https://doi.org/10.3390/app11104383>

14. Reguła T., Frączek J., Fitas J. A Model of Transport of Particulate Biomass in a Stream of Fluid. *Processes*. 2020. Vol. 9, no. 1. P. 5. <https://doi.org/10.3390/pr9010005>
15. Research of the process of air separation of grain material in a vertical zigzag channel / S. Stepanenko et al. *Journal Of Central European Agriculture*. 2023. Vol. 24, no. 1. P. 225–235. <https://doi.org/10.5513/jcea01/24.1.3732>
16. Theoretical studies of the process of grain material movement on the surface of the stepped vibrating feeder / S. Stepanenko et al. *2(105)*. 2022. No. 2(105). P. 25–32. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2022-2-3>
17. Theoretical study of pneumatic separation of grain mixtures in vortex flow / V. Adamchuk et al. *In Engineering for Rural Development*. No. 20. P. 657–664.
18. Theoretical Study of Vibrocentrifugal Separation of Grain Mixtures on a Sieveless Seed-cleaning Machine / V. Adamchuk et al. *Rural Sustainability Research*. 2021. Vol. 46, no. 341. P. 116–124. <https://doi.org/10.2478/plua-2021-0023>

References

1. Kotov, B. I., & Stepanenko, S. P. (2023). Basics of the theory and technology of air separation of grain materials. Kyiv: TsP Komprynt. [in Ukrainian].
2. Kotov, B. I., & Stepanenko, S. P. (2020). The main theoretical principles of the separation of grain material in air ducts with non-uniform air flow speed. *Design, production and operation of agricultural machines*, (50), 122–123. [in Ukrainian].
3. Rebot, D. P., & Topilnytskyi, V. H. (2022). Mathematical model of movement of loose material in a vibrating separator. *Automation of production processes in mechanical engineering and instrument engineering*, (56), 67–74. [in Ukrainian].
4. Rebot, D. P., & Topilnytskyi, V. H. (2021). Mathematical modeling of the interaction of dynamic characteristics of loose raw materials in the process of vibration separation. *Scientific Bulletin of UNFU*.31 (2), 88-92. [in Ukrainian].
5. Stepanenko, S. P., Kotov, B. I., & Kalinichenko, R. A. (2021). Study of the movement of grain material particles in a vertical channel under the conditions of air flow pulsations. *Agricultural machinery*, (47), 25–36. <http://dx.doi.org/10.36910/acm.vi47.619> [in Ukrainian].
6. Nesterenko, A., Leshchenko, S., Vasylykovskiy, O., & Petrenko, D. (2017). Analytical assessment of the pneumatic separation quality in the process of grain multilayer feeding. *INMATEH. Agricultural Engineering*, (53(3)), 65–70. [in English].
7. Mykhailov, Y., Zadosna, N., Postnikova, M., Pedchenko, G., Khmelovskiy, V., Bondar, M., ... Tomaszewska-Górecka, W. (2021). Energy Assessment of the Pneumatic Sieve Separator for Agricultural Crops. *Agricultural Engineering*, 25(1), 147–156. <http://dx.doi.org/10.2478/agriceng-2021-0012> [in English].
8. Rogovskii, I., Titova, L., Trokhaniak, V., Trokhaniak, O., & Stepanenko, S. (2020). Experimental study of the process of grain cleaning in a vibro-pneumatic resistant separator with passive weeders. *Series II: Forestry Wood Industry Agricultural Food Engineering*, 13(62)(1), 117–128. <http://dx.doi.org/10.31926/but.fwiafe.2020.13.62.1.11> [in English].
9. Tishchenko, L., Kharchenko, S., Kharchenko, F., Bredykhin, V., & Tsurkan, O. (2016). Identification of a mixture of grain particle velocity through the holes of the vibrating sieves grain separators. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(7(80)), 63. <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65920> [in English].
10. Aliiev, E., Gavrilchenko, A., Tesliuk, H., Tolstenko, A., & Koshul'ko, V. (2019). Improvement of the sunflower seed separation process efficiency on the vibrating surface. *Acta Periodica Technologica*, (50), 12–22. <http://dx.doi.org/10.2298/apt1950012a> [in English]
11. Stepanenko, S., Aneliak, M., Kuzmych, A., Kustov, S., & Lysaniuk, V. (2022). Improving the efficiency of harvesting sunflower seed crops. *INMATEH Agricultural Engineering*, 331–340. <http://dx.doi.org/10.35633/inmateh-67-34> [in English].
12. Bredykhin, V., Pak, A., Gurskyi, P., Denisenko, S., & Bredykhina, K. (2021). Improving the mechanical-mathematical model of pneumatic vibration centrifugal fractionation of grain materials based on their density. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(1(112)), 54–60. <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2021.236938> [in English].
13. Kharchenko, S., Borshch, Y., Kovalyshyn, S., Piven, M., Abduiev, M., Miernik, A. Et al. (2021). Modeling of Aerodynamic Separation of Preliminarily Stratified Grain Mixture in Vertical Pneumatic Separation Duct. *Applied Sciences*, 11(10), 4383. <http://dx.doi.org/10.3390/app11104383> [in English].

14. Reguła, T., Frączek, J., & Fitas, J. (2020). A Model of Transport of Particulate Biomass in a Stream of Fluid. *Processes*, 9(1), 5. <http://dx.doi.org/10.3390/pr9010005> [in English].
15. Stepanenko, S., Kotov, B., Kuzmych, A., Kalinichenko, R., & Hryshchenko, V. (2023). Research of the process of air separation of grain material in a vertical zigzag channel. *Journal Of Central European Agriculture*, 24(1), 225–235. <http://dx.doi.org/10.5513/jcea01/24.1.3732> [in English].
16. Stepanenko, S., Kotov, B., Rud, A., & Zamrii, M. (2022). Theoretical studies of the process of grain material movement on the surface of the stepped vibrating feeder. *2(105)*, 25–32. <http://dx.doi.org/10.37128/2306-8744-2022-2-3> [in English].
17. Adamchuk, V., Bulgakov, V., Ivanovs, S., Holovach, I., & Ihnatiev, Y. (b. d.). Theoretical study of pneumatic separation of grain mixtures in vortex flow. *In Engineering for Rural Development*, (20), 657–664. [in English].
18. Adamchuk, V., Bulgakov, V., Gadzalo, I., Ivanovs, S., Stepanenko, S., Holovach, I., & Ihnatiev, Y. (2021). Theoretical Study of Vibrocentrifugal Separation of Grain Mixtures on a Sieveless Seed-cleaning Machine. *Rural Sustainability Research*, 46(341), 116–124. <http://dx.doi.org/10.2478/plua-2021-0023> [in English].

Serhii Stepanenko, D.Sc., Senior Researcher, **Daryna Volyk**, Junior Research Fellow

Institute of Mechanics and Automation of Agroindustrial Production, National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Hlevakha, Ukraine

Mathematical Modeling and the Results of Experimental Research of the Process of Density-Based Seed Separation Using Vibro-Pneumatic-Impulse Technology

The results of the mathematical simulation of the movement of grain material on the surface of the perforated deck of the vibro-pneumatic-impulse separator have been presented. Both force and kinematic models were employed, considering the geometric characteristics of the perforated deck surface in dynamic interaction with the kinematic indicators of processing. The calculations based on the proposed model allow for determining the trajectories of movement, velocities, and accelerations of the grain seeds within the grain medium under the combined action of vibrations and the pneumatic-impulse flow.

As a result of the scientific research and analysis of the forces created according to the developed mathematical model, it has been established that the most significant influence on the process of grain material movement, both in the horizontal and vertical directions, is exerted by the impulse force (pulsations) of the air flow, the pressure force of the underlying layers of the grain medium (for seeds in the middle part and on the surface of the perforated deck), frictional forces, the weight of the seeds, and the Archimedean force. Therefore, in order to intensify the process of fractionation of the grain medium and increase the specific productivity of the vibro-pneumatic-impulse separator, it is necessary to increase the force of the pulsating air flow, the force of inertia of the oscillatory motion, friction, and lateral pressure on the seeds within the grain medium.

seeds, density, specific load, differential equations, seed displacement velocity, experimental research, prototype

Одержано (Received) 18.09.2023

Прорецензовано (Reviewed) 04.10.2023

Прийнято до друку (Approved) 27.12.2023