

Никифоров А. О.,  
ORCID 0000-0001-7788-8878  
E-mail: [toninikiforov89@gmail.com](mailto:toninikiforov89@gmail.com)

Антощенко Р. В.,  
ORCID 0000-0003-0769-7464  
E-mail:  
[roman.antoshchenkov@btu.kharkov.ua](mailto:roman.antoshchenkov@btu.kharkov.ua)

Галич І. В.,  
ORCID 0000-0002-9137-036X  
E-mail: [galych.ivan@ukr.net](mailto:galych.ivan@ukr.net)

Державний біотехнологічний університет,  
м. Харків, Україна

## ВПЛИВ АЕРОДИНАМІЧНИХ ФАКТОРІВ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВІБРОФРИКЦІЙНОЇ СЕПАРАЦІЇ ДРІБНОНАСІННЄВИХ МАТЕРІАЛІВ

DOI <https://doi.org/10.31359/2311.441X.2026.28.30>

УДК 631.362:62-752

*Никифоров А. О., Антощенко Р. В., Галич І. В. Вплив аеродинамічних факторів на ефективність віброфрикційної сепарації дрібнонасіненних матеріалів*

**Анотація.** Дві паралельно розташовані робочі поверхні блока віброфрикційного насінневого сепаратора утворюють плоский повітряний канал, у якому під час роботи формується складний знакозмінний рух повітря. Поле швидкостей у робочій зоні змінюється за періодичним законом, що зумовлює виникнення неоднорідного розподілу тиску та швидкостей у міжплощинному просторі. Встановлено, що знакозмінний повітряний потік суттєво впливає на динаміку переміщення насіння, особливо дрібнонасіненого з вираженими аеродинамічними властивостями. У таких випадках можливе зависання насіння над робочою поверхнею, що призводить до зменшення сили тертя та погіршення якості сепарації внаслідок перемішування фракцій. Отже, підвищення ефективності сепарації дрібнонасіненних матеріалів шляхом урахування аеродинамічних факторів і обґрунтування конструктивно-режимних параметрів віброфрикційного сепаратора є актуальним науково-прикладним завданням для агропромислового виробництва.

**Ключові слова:** насіння, віброфрикційний поділ, ефективність, ефективність сепарації, динаміка переміщення, знакозмінний повітряний потік, аеродинамічний екран.

*Nykyforov A.O., Antoshchenkov R.V., Halych I.V. Influence of aerodynamic factors on the performance of vibratory-friction seed separation for small-seeded crops*

**Abstract.** Two parallel working surfaces of a vibratory-friction seed separator form a flat air channel in which a complex alternating airflow is generated during operation. The velocity field in the working zone varies periodically, resulting in a non-uniform distribution of pressure and airflow velocities in the interplanar space. It has been established that the alternating airflow significantly affects the motion dynamics of seeds, especially small seeds with pronounced aerodynamic properties. In such cases, seed suspension above the working surface may occur, leading to a reduction in friction forces and deterioration of separation quality due to mixing of fractions. Thus, improving the efficiency of separation of small-seeded materials by considering aerodynamic factors and substantiating the design and operating parameters of the vibratory-friction separator is an actual scientific and applied task for agro-industrial production.

**Key words:** seeds, vibratory-friction separation, efficiency, separation efficiency, motion dynamics, alternating airflow, aerodynamic screen.

### Актуальність проблеми

Аналіз наукових досліджень з віброфрикційної сепарації дрібнонасіневих матеріалів свідчить про те, що недостатньо вивчено негативний вплив аеродинамічних сил на процес вібраційної сепарації насінневих матеріалів. У відомих дослідженнях запропоновано аналітичні висловлювання для розрахунку величини впливу аеродинаміки на параметри віброфрикційного руху насіння [1-11]. Однак тут не враховуються бічні аеродинамічні сили та аеродинамічні моменти, що виникають через нерівномірний розподіл тиску поверхні насіння при обтіканні їх потоком повітря.

Важливість урахування аеродинамічного чинника під час обробки насінневого матеріалу підкреслюється в наукових дослідженнях [2]. Однак числові показники для виміру цих характеристик не сформульовані. В іншому дослідженні надається огляд механізму взаємодії робочих органів сепаратора з повітрям [3]. Проте чисельні математичні моделі параметричних досліджень перспективних машин не представлені. Розроблено чисельну модель течії газу та частинок у циклонних сепараторах [4]. Але при цьому за рамками дослідження опинилися процеси взаємодії робочих органів з повітрям за наявності пристроїв зниження негативного впливу аеродинамічного фактора. Також вивчалася взаємодія повітря із ширококутними дифузорами [5]. Однак характер взаємодії повітря з пристроями типу аеродинамічного екрану та ефективність їх використання не розглядалися.

Розроблено математичну модель коливального руху еліпсоїдного насіння на похилій шорсткій поверхні [6]. Однак вплив аеродинамічних сил та моментів не враховується. Крім того, представлення насіння як тіл обертання не дозволяє враховувати їх аеродинамічні властивості. У роботі [7] досліджено процеси взаємодії насіння з робочими поверхнями з урахуванням коливань повітря на основі аналітичних плоских газодинамічних моделей. За результатами дослідження створено моделі розподілу швидкості повітря за висотою міжплощинного простору на заданих перерізах. Проведено оцінювання впливу аеродинамічного чинника на коливальний рух насіння, спричинений їх перенесенням повітряним потоком.

Аналіз способу підвищення ефективності процесу очищення насіння соняшнику від домішок свідчить про можливість вибору параметрів роботи вібраційного насінневого сепаратора за критерієм зниження впливу повітряного впливу [8]. І, як показують результати досліджень, підбір кутів нахилу, амплітуди та частоти коливань робочих поверхонь дозволяє знизити негативну дію повітря при сепарації олійного насіння. Однак для дрібнонасіневих, легких культур цей метод не дає задовільних результатів, оскільки насіння за своїми параметрами та аеродинамічними властивостями не відрізняється від домішок.

Інші автори пропонують метод розрахунку поля швидкості та тиску повітря у міжплощинному просторі блоку сепаратора для тривимірного випадку [9]. В результаті отримані закономірності зміни динаміки повітря за різних фазових положень робочих органів.

Проведено оцінювання впливу аеродинамічного чинника на коливальний рух насіння, спричинений їх перенесенням повітряним потоком [10]. Проте запропонована модель досить трудомістка під час використання її проектування вібраційних машин.

Автори дослідження представили результати побудови чотирифакторних регресійних моделей другого порядку з метою оцінки ефективності поділу сумішей насіння пастернаку, кропу та салату з урахуванням динаміки повітря між робочими поверхнями блоку віброфрикційного сепаратора [11]. Регресії побудовані на основі чисельного моделювання віброфрикційного руху насіння з урахуванням їх взаємодії зі знакозмінним повітряним потоком. Проте точність рівнянь регресії повністю залежить

від рівня відповідності використовуваної математичної моделі. Порівняльна оцінка отриманих результатів із результатами натурального експерименту відсутня.

Таким чином, аналіз інших раніше проведених досліджень дозволяє встановити, що:

– створено чисельні моделі вібропереміщення насіння під час очищення (сортування) насінневих сумішей на вібраційних машинах з урахуванням динаміки повітря всередині блоків робочих поверхонь. Ці моделі забезпечують можливість проведення чисельного моделювання робочих процесів вібраційних машин з урахуванням заходів щодо усунення аеродинамічного фактора для легких насінневих сумішей;

– порівняльна оцінка ефективності вібраційної сепарації легкого насіння на основі чисельного моделювання процесів віброфрикційної сепарації не проводилася.

У зв'язку з цим виникає проблема обґрунтування чисельного показника ефективності поділу дрібнодисперсних матеріалів на віброфрикційних насінневих сепараторах з аеродинамічним екраном.

### Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є обґрунтування кількісного показника, що вимірює зміну якості сепарації залежно від конструкції та параметрів роботи віброфрикційних насінневих сепараторів з аеродинамічним екраном.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі окремі завдання:

– побудувати аналітичний вираз для показника якості поділу насінневого матеріалу;

– розробити методику розрахунку показника якості поділу на віброфрикційному сепараторі з аеродинамічним екраном при заданих конструктивних та режимних параметрах.

### Результати досліджень

#### 1 Аналітичний вираз для оцінки показника якості сепарації насіння

Фізичний зміст показника якості сепарації насінневого матеріалу на віброфрикційному сепараторі з аеродинамічним екраном проілюстровано за допомогою (рис. 1). Насіння з різних фракцій рухається вздовж робочої поверхні сепаратора під дією вібраційних імпульсів, сили тяжіння, сили опору та аеродинамічних сил і моментів. Їх можливі траєкторії руху перебувають у межах секторів можливих траєкторій (рис. 1). У порівнянні з насінням, менш чутливим до дії повітряного потоку (рис. 1 а), сектори ймовірних траєкторій легкого насіння, чутливого до дії повітряного потоку, збільшуються і зростає ступінь їх перекриття (рис. 1 б).

Аналітичний вираз для оцінки чисельного значення показника якості сепарації має вигляд:

$$K(\mathbf{X}) = \frac{\sum_{i=1}^{N^{\Phi}} (\delta_i^a + \Delta_i^a)}{\sum_{i=1}^{N^{\Phi}} (\delta_i^b + \Delta_i^b)}, \quad (1)$$

$$\Delta_i = \begin{cases} (\varphi_i + \delta_i) - (\varphi_{i+1} + \delta_{i+1}), & \text{якщо } (\varphi_i + \delta_i) - (\varphi_{i+1} + \delta_{i+1}) \geq 0 \\ 0, & \text{якщо } (\varphi_i + \delta_i) - (\varphi_{i+1} + \delta_{i+1}) < 0 \text{ або } i = N^{\Phi} \end{cases}, \quad (2)$$

де  $\Delta_i$  – кут сектора перекриття сусідніх секторів можливих траєкторій насіння  $i$ -ої та  $i+1$ -ої фракцій насінневого матеріалу;

$\varphi_i$  – математичне очікування кута відхилення середньої осі віброфрикційного руху насіння  $i$ -ої фракції щодо осі  $Y$  системи координат, пов'язаної з робочою поверхнею;

$\delta_i$  – половинний кут сектора можливих траєкторій насіння  $i$ -ої фракції;

$N^{\phi}$  – кількість фракцій насіннєвого матеріалу, що досліджується;

$X$  – вектор конструктивно-режимних параметрів віброфрикційного сепаратора з аеродинамічним екраном.

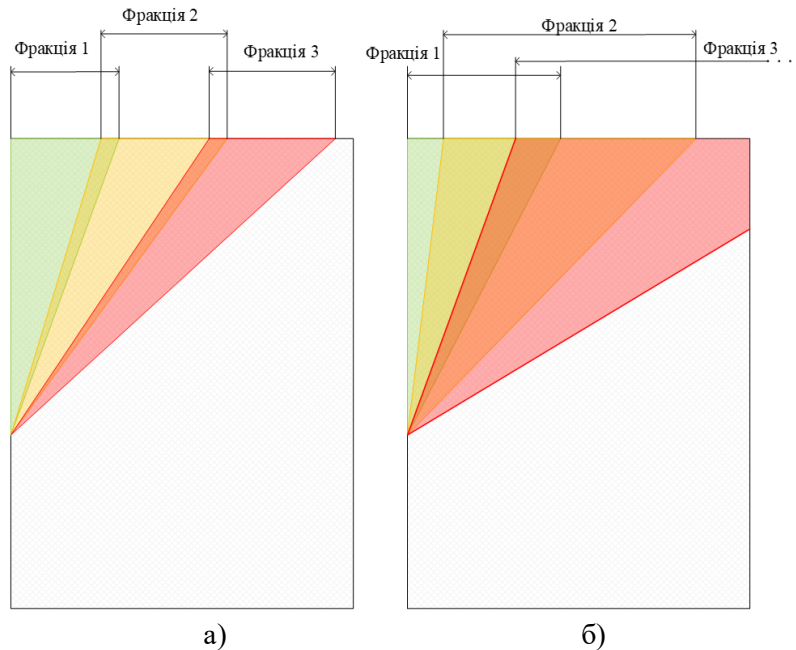


Рис. 1. Ефективність застосування віброфрикційного сепаратора при розподілі насіннєвих матеріалів: а) звичайних; б) чутливих до дії повітряного потоку

Відмітки «б» і «а», які є у виразі, визначають параметри, отримані без урахування та з урахуванням впливу аеродинамічних сил та моментів відповідно.

Тобто, показник (1) показує у скільки разів зростає відносно перекриття секторів ймовірних траєкторій насіння різних фракцій щодо аналогічних секторів, отриманих за відсутності аеродинамічних сил та моментів. У разі, якщо шкідлива дія знакозмінного потоку зведена до нуля, показник (1) дорівнює одиниці. При погіршенні якості сепарації внаслідок перемішування фракцій насіннєвого матеріалу значення показника (1) збільшується і стає більше одиниці.

## 2 Методика розрахунку показника якості поділу насіння на віброфрикційних насіннєвих сепараторах з аеродинамічним екраном

Методика розрахунку показника якості ґрунтується на статистичній обробці квазівипадкових траєкторій руху насіння щодо робочої поверхні сепаратора. Покрокове інтегрування траєкторій здійснюється з використанням чисельної моделі віброфрикційного руху насіння заданої форми з встановленими фізико-механічними характеристиками при заданих конструктивно-режимних параметрах віброфрикційного сепаратора з екраном.

Алгоритм інтегрування вібраційного руху насіння певної форми із встановленими фізико-механічними характеристиками наведено на (рис. 2).

При вході до алгоритму задаються початкові значення кінематичних параметрів насіння. Далі, для поточної фази коливань робочої поверхні, обчислюється поле швидкостей та тисків повітря у середині області [12].

Для вектора швидкості повітря, що відповідає точці місцезнаходження насіння, з урахуванням його просторового орієнтування, обчислюються аеродинамічні характеристики [13].

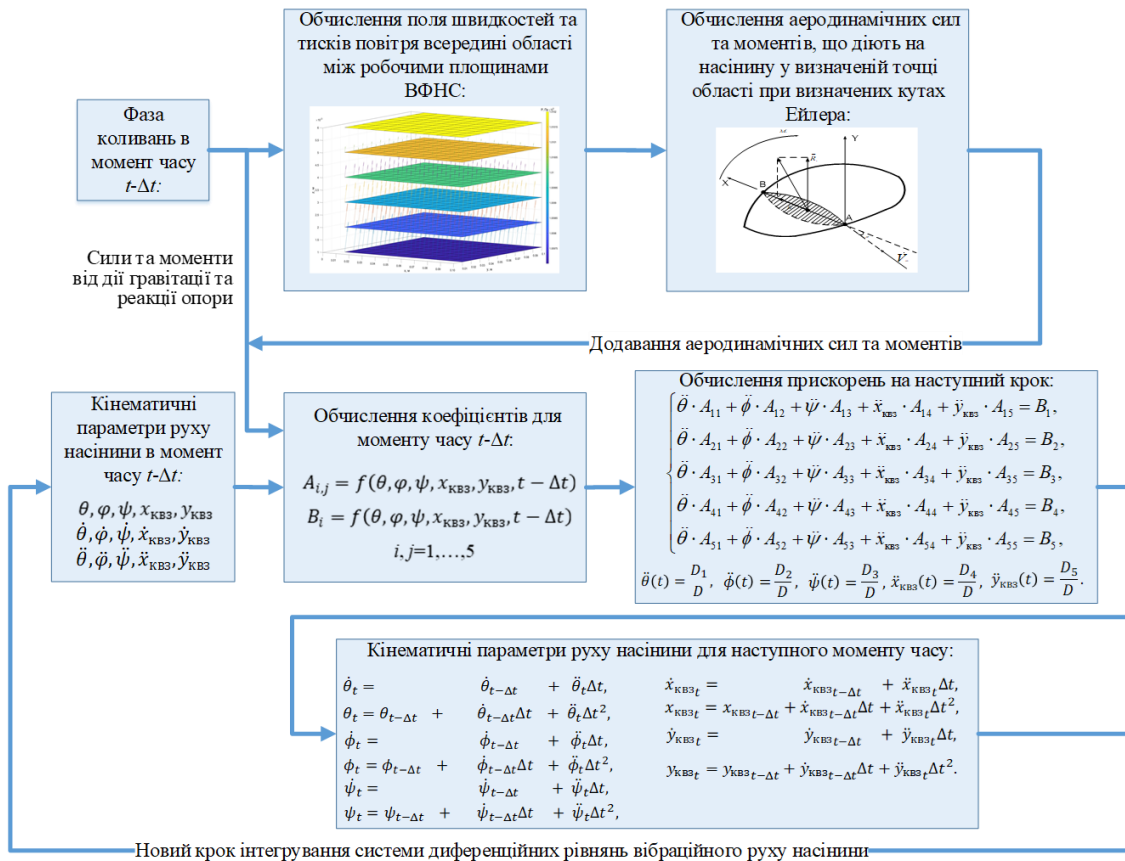


Рис. 2. Алгоритм інтегрування вібраційного руху насіння певної форми із встановленими фізико-механічними характеристиками

Миттєві аеродинамічні сили та моменти, що діють на поверхню насіння, додаються до системи рівнянь вібраційного руху. Як базову використано модель безвідривного руху твердого тіла з перекочуванням і ковзанням по шорсткій похилій поверхні, що здійснює вібраційні коливання [10]. Тіло рухається під дією:

- сили тяжіння;
- реакції опори;
- аеродинамічних сил і моментів, що виникають під час руху повітря.

Створена модель дозволяє враховувати вплив аеродинамічних сил та моментів на кінематичні параметри вібраційного руху насіння залежно від фази коливань віброфрикційного сепаратора та точки місцезнаходження насіння в ділянці між двома робочими поверхнями. Вплив руху повітря проявляється як відхилення апроксимуючої осі вібраційного руху насіння та збільшення сектора можливих траєкторій, що будується щодо цієї осі.

### 3 Обговорення отриманих результатів

Показник ефективності поділу насіння (1) є відносним. Він показує у скільки разів гірше відбувається сепарування насіннєвого матеріалу, чутливого до дії повітряного

поток стосовно деяких еталонних умов сепарації. До таких відноситься умова, коли обробка насінневого матеріалу на віброфрикційних насінневих сепараторах відбувається за умов вакууму. Насправді такі умови недосяжні. Однак, при використанні математичної моделі, еталонні умови отримують шляхом прирівнювання до нуля аеродинамічних сил та моментів, що діють на насіння, траєкторія якого інтегрується.

Методика розрахунку показника ефективності поділу насіння реалізується шляхом розділення використовуваних математичних моделей. На першому етапі визначається поле швидкостей повітря в робочому просторі за фазами коливань робочих поверхонь, після чого в це поле вводиться насіння, що здійснює вібраційний рух відносно робочої поверхні. Такий підхід спрощує чисельне розв'язання задачі, оскільки не враховується вплив насінневого матеріалу на параметри знакозмінного повітряного потоку, що зменшує її розмірність. Водночас результати моделювання містять певну похибку, яка проявляється у завищеній оцінці впливу аеродинамічних ефектів на якість сепарації порівняно з реальними процесами. Це зумовлено нехтуванням в'язкістю повітря та процесами у його прикордонному шарі поблизу робочих поверхонь сепаратора.

Проте розроблена математична модель не спотворює характеру залежності показника якості сепарації дрібнонасінневих матеріалів від конструктивно-режимних параметрів віброфрикційного насінневого сепаратора з аеродинамічним екраном. Це дає змогу використовувати її для аналізу та кількісного порівняння альтернативних варіантів конструкції і режимів роботи сепаратора.

### Висновки

1. Як показник оцінювання якості сепарації насінневого матеріалу використано відношення сум кутів розкриття та перекриття секторів ймовірних траєкторій насіння різних фракцій, отриманих за умов дії та відсутності знакозмінного повітряного потоку. Значення цього показника є чутливим до зміни конструктивно-режимних параметрів віброфрикційного насінневого сепаратора з аеродинамічним екраном, що дає змогу на його основі сформулювати критерій оптимальності для обґрунтування конструктивних і режимних параметрів перспективних сепараторів.

2. Методику розрахунку значень показника якості сепарації насінневого матеріалу реалізовано у вигляді алгоритму інтегрування траєкторії безвідривного віброфрикційного руху насіння відносно робочої поверхні сепаратора в умовах дії знакозмінного повітряного потоку. Прийняті в математичних моделях припущення (нехтування впливом в'язкості повітря та градієнтами повітряного потоку в прикордонному шарі) зменшують розмірність обчислювальної задачі, не спотворюючи характеру залежності показника якості сепарації від конструктивно-режимних параметрів.

3. Показано, що запропонований підхід до моделювання процесу віброфрикційної сепарації з урахуванням аеродинамічних ефектів забезпечує можливість кількісної оцінки впливу конструктивно-режимних параметрів на якість розділення дрібнонасінневих матеріалів.

### Список використаних джерел

1. Алієв Е.Б., Лупко К.О. Морфологічні ознаки та фізико-механічні властивості насіння дрібнонасінневих культур. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. 2020. № 50 С. 27-35. doi:<https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.27-35>

2. E. Ramadan, R. Sherif, M. ElAmir, E. Gamal. Aerodynamic properties of some oilseeds crops under different moisture conditions. Mansoura Journal of Soil Sciences and

Agricultural Engineering, 2011. Vol. 2. III. 495-507.  
[https://www.researchgate.net/publication/259178805\\_Aerodynamic\\_properties\\_of\\_some\\_oils\\_eeds\\_crops\\_under\\_different\\_moisture\\_conditions](https://www.researchgate.net/publication/259178805_Aerodynamic_properties_of_some_oils_eeds_crops_under_different_moisture_conditions)

3. B. Chen, B. Wang, F. Mao, B. Ke, J. Wen, R. Tian, C. Lu, Review on separation mechanism of corrugated plate separator, *Annals of Nuclear Energy*, 2020. Vol. 144. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107548>

4. Cortés, C.; Gil, A. Modeling gas and particle flow inside cyclone separators. *Прор. Energy Combust. Sci.*, 2007. 33, III. 409-452. <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2007.02.001>

5. Mehta, RD 1977. Аеродинамічне design blower tunnels with wide-angle diffusers. *Progress in Aerospace Sciences*, 18 (1): 59-120. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0376042177900033>

6. Golovanevskiy V.A., Arsentyev V.A., Blekhman I.I., Vasilkov V.B., Azbel Y.I., Yakimova K.S. Vibration-induced phenomena in bulk granular materials. *International Journal of Mineral Processing*. 2011. Vol. 100, No. 3-4. P. 79-85. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2011.05.001>

7. Bourges, Gastón. Air-seeds flow analysis in a distributor head of "air drill" seeder. *International Society for Horticultural Science*, 2013. PP 259-264. [https://www.actahort.org/books/1008/1008\\_34](https://www.actahort.org/books/1008/1008_34)

8. Aliev E., Gavrilchenko A., Tesliuk H., Tolstenko A., Koshul'ko V. Improvement of flower seed separation process efficiency on vibration surface. *Acta Periodica Technologica*, 2019. III. 12-22. [https://www.researchgate.net/publication/338154961\\_Improvement\\_of\\_the\\_sunflower\\_seed\\_separation\\_process\\_efficiency\\_on\\_the\\_vibrating\\_surface](https://www.researchgate.net/publication/338154961_Improvement_of_the_sunflower_seed_separation_process_efficiency_on_the_vibrating_surface)

9. Antoshchenkov R.V., Nykyforov A.O., Halych I.V., Tolstolutskyi V.V., Antoshchenkova V.V., Diundik S.O. Solution of the system of gas-dynamic equations for the processes of interaction of vibrators with air. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 2, No. 7 (104). P. 67-73. <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/198501>

10. Nykyforov A.O., Nykyforova A.O., Antoshchenkov R.V., Antoshchenkova V.V., Diundik S.O., Mazanov V.V. Development of a mathematical model of vibratory non-lift movement of light seeds taking into account aerodynamic forces and moments. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 3, No. 1 (111). P. 70-78. <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/232508>

11. Nykyforov A.O., Antoshchenkov R.V., Halych I.V., Kis V.M., Polyanskyi P.O., Koshulko V.I., Tymchak D.V., Dombrovska A.O., Kilimnik I.V. Construction of a regression model for assessing the efficiency of separation of lightweight seeds on vibratory machines considering measures to reduce the aerodynamic factor influence. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. P. 24-34. <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/253657>

12. Antoshchenkov R.V., Nykyforov A.O., Halych I.V., Tolstolutskyi V.V., Antoshchenkova V.V., Diundik S.O. Solution of the system of gas-dynamic equations for the processes of interaction of vibrators with air. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 2, No. 7 (104). P. 67-73.

13. Lukianenko V.M., Nykyforov A.A., Halych I.V. Method for calculating aerodynamic characteristics of volumetric bodies of irregular shape. *Bulletin of KhNTUA named after Petro Vasylenko*. Kharkiv, 2015. Issue 156. P. 459-464.

14. Matalka, R., DeShazo, J.R., & Callahan, C. (2013). Moving towards resiliency: An assessment of the costs and benefits of energy security investments for the San Pedro Bay ports. *UCLA Luskin Center for Innovation*. 58 p. [https://innovation.luskin.ucla.edu/wp-content/uploads/2019/03/Moving\\_Towards\\_Resiliency.pdf](https://innovation.luskin.ucla.edu/wp-content/uploads/2019/03/Moving_Towards_Resiliency.pdf)

## References

1. Aliev, E.B., & Lupko, K.O. (2020). Morphological features and physicomechanical properties of small-seeded crops. *Design, Production and Operation of Agricultural Machines*, 50, 27–35. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.27-35>
2. Ramadan, E., Sherif, R., ElAmir, M., & Gamal, E. (2011). Aerodynamic properties of some oilseed crops under different moisture conditions. *Mansoura Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering*, 2, 495–507.
3. Chen, B., Wang, B., Mao, F., Ke, B., Wen, J., Tian, R., & Lu, C. (2020). Review on separation mechanism of corrugated plate separator. *Annals of Nuclear Energy*, 144. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107548>
4. Cortés, C., & Gil, A. (2007). Modeling gas and particle flow inside cyclone separators. *Progress in Energy and Combustion Science*, 33, 409–452. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.02.001>
5. Mehta, R.D. (1977). The aerodynamic design of blower tunnels with wide-angle diffusers. *Progress in Aerospace Sciences*, 18(1), 59–120.
6. Golovanevskiy, V.A., Arsenyev, V.A., Blekhman, I.I., Vasilkov, V.B., Azbel, Y.I., & Yakimova, K.S. (2011). Vibration-induced phenomena in bulk granular materials. *International Journal of Mineral Processing*, 100(3–4), 79–85. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2011.05.001>
7. Bourges, G. (2013). Air-seeds flow analysis in a distributor head of an “air drill” seeder. *Acta Horticulturae*, 1008, 259–264. [https://www.actahort.org/books/1008/1008\\_34](https://www.actahort.org/books/1008/1008_34)
8. Aliev, E., Gavrilenko, A., Tesliuk, H., Tolstenko, A., & Koshulko, V. (2019). Improvement of the sunflower seed separation process efficiency on the vibrating surface. *Acta Periodica Technologica*, 12–22.
9. Antoshchenkov, R.V., Nykyforov, A.O., Halych, I.V., Tolstolutskyi, V.V., Antoshchenkova, V.V., & Diundik, S.O. (2020). Solution of the system of gas-dynamic equations for the processes of interaction of vibrators with air. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(7(104)), 67–73. <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/198501>
10. Nykyforov, A.O., Nykyforova, A.O., Antoshchenkov, R.V., Antoshchenkova, V.V., Diundik, S.O., & Mazanov, V.V. (2021). Development of a mathematical model of vibratory non-lift movement of light seeds taking into account aerodynamic forces and moments. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(1(111)), 70–78. <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/232508>
11. Nykyforov, A.O., Antoshchenkov, R.V., Halych, I.V., Kis, V.M., Polyanskyi, P.O., Koshulko, V.I., Tymchak, D.V., Dombrovska, A.O., & Kilimnik, I.V. (2022). Construction of a regression model for assessing the efficiency of separation of lightweight seeds on vibratory machines considering measures to reduce aerodynamic influence. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 24–34. <http://journals.uran.ua/eejet/article/view/253657>
12. Antoshchenkov, R.V., Nykyforov, A.O., Halych, I.V., Tolstolutskyi, V.V., Antoshchenkova, V.V., & Diundik, S.O. (2020). Solution of the system of gas-dynamic equations for the processes of interaction of vibrators with air. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(7(104)), 67–73.
13. Lukianenko, V.M., Nykyforov, A.A., & Halych, I.V. (2015). Method for calculating aerodynamic characteristics of volumetric bodies of irregular shape. *Bulletin of KhNTUA named after Petro Vasylenko*, 156, 459–464.
14. Matalka, R., DeShazo, J.R., & Callahan, C. (2013). Moving towards resiliency: An assessment of the costs and benefits of energy security investments for the San Pedro Bay ports. UCLA Luskin Center for Innovation. 58 p. [https://innovation.luskin.ucla.edu/wp-content/uploads/2019/03/Moving\\_Towards\\_Resiliency.pdf](https://innovation.luskin.ucla.edu/wp-content/uploads/2019/03/Moving_Towards_Resiliency.pdf).

Отримано: 06.04.2026. Прийнято: 17.04.2026. Опубліковано: 15.05.2026.