

УДК 631.362.36

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2026.56.224-232>**О. М. Васильковський**, проф., канд. техн. наук*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький,**Україна, e-mail: olexa74@ukr.net*

Порівняння енергетики вертикального та горизонтального повітряних каналів зерноочисних машин

Зіставлено енергетику двох схем повітряного очищення зерна – вертикального аспіраційного та горизонтального (похилого) каналів. На основі рівняння руху частинки в повітряному потоці встановлено, що потужність вентилятора зростає як куб робочої швидкості повітря. У вертикальному каналі робоча швидкість близька до швидкості витання, у горизонтальному – менша за неї, тому остання схема енергоощадніша, але дає менш чітке розділення.

пневмосепарація, аспіраційний канал, швидкість витання, коефіцієнт парусності, енергосміність, зерноочисна машина

Постановка проблеми. Повітряне очищення є обов'язковою стадією післязбиральної обробки зерна. У повітряному потоці зернова суміш розділяється за аеродинамічними властивостями частинок, основною з яких є швидкість витання. Повітряний потік в зерноочисних машинах організовують двома принципово різними способами: у вертикальному аспіраційному каналі повітря рухається вгору, назустріч силі тяжіння, і виносить легкі домішки, тоді як очищене зерно падає самопливом; у горизонтальному (похилому) нагнітальному каналі повітря перетинає падаючий шар зерна, відхиляючи частинки по горизонталі тим більше, чим вони легші. Обидві схеми розв'язують однакову задачу, проте їхня енергетика суттєво різна, що й визначає актуальність порівняльного аналізу енергоспоживання за зіставної якості розділення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теорію руху компонентів зернової суміші в повітряному потоці та параметри пневмосепаруючих каналів досліджено в низці праць. Нерівномірність повітряного потоку в каналі та її вплив на якість розділення вивчали в роботах [1, 6]. Рух зернового матеріалу й контактну взаємодію легких домішок із потоком розглянуто в [2, 6], а теоретичні засади сепарації за аеродинамічними ознаками – у працях Котова і Степаненка [3, 4]. Параметри аеродинамічного сепарування насінневих сумішей обґрунтовано в [5], алгоритми функціонування інерційно-прямоточних зерноочисних машин – у [7]. Сучасні математичні моделі сепарації в вертикальному пневмоканалі, зокрема з попередньою стратифікацією суміші та неоднорідним полем швидкостей, наведено в [8, 9, 10]. Водночас більшість досліджень присвячено окремо взятій схемі каналу; систематичного енергетичного порівняння вертикальної та горизонтальної орієнтацій повітряного потоку, що враховує кубічну залежність потужності від швидкості, у відомих публікаціях бракує. Саме цій невирішеній частині проблеми присвячено статтю.

Постановка завдання. Мета роботи – на основі аеродинамічної моделі руху частинки в повітряному потоці побудувати енергетичні залежності для вертикального та горизонтального повітряних каналів і кількісно порівняти їхнє енергоспоживання за зіставної задачі очищення.

Виклад основного матеріалу. На частинку, що рухається відносно повітря з відносною швидкістю, діє аеродинамічна сила опору

$$R = c_x \rho_a F \frac{v_r^2}{2} \quad (1)$$

де c_x – коефіцієнт лобового опору; ρ_a – густина повітря; F – площа міделового перерізу частинки; v_r – відносна швидкість.

Умова рівноваги частинки у висхідному потоці
 $R = mg$ визначає швидкість витання

$$v_t = \sqrt{\frac{2mg}{c_x \rho_a F}} \quad (2)$$

Аеродинамічні властивості частинки зручно поєднати коефіцієнтом парусності

$$k_p = \frac{c_x \rho_a F}{2m} = \frac{g}{v_t^2} \quad (3)$$

Чим більший k_p і, відповідно менша v_t , тим легше частинка виноситься потоком; саме за відмінністю v_t повітряний потік розділяє суміш (рис. 2).

Рух частинки описує рівняння

$$\frac{d\vec{u}}{dt} = \vec{g} + k_p |\vec{v} - \vec{u}| (\vec{v} - \vec{u}) \quad (4)$$

де v – швидкість повітря; u – швидкість частинки.

Фізична відмінність двох схем зводиться до відмінності напрямку вектора v відносно вектора сили тяжіння g (рис. 1).

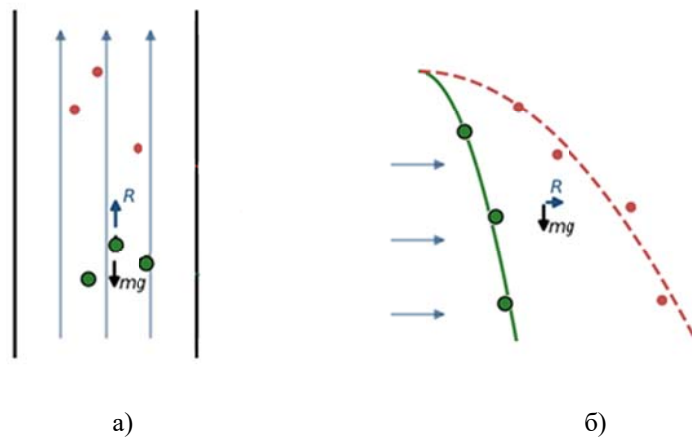


Рисунок 1 – Схеми та баланс сил у вертикальному (а) та горизонтальному (б) повітряних каналах

Джерело: розроблено автором

У вертикальному каналі, за умови $u < v$, маємо

$$\frac{du}{dt} = k_p (v - u)^2 - g, \quad u_\infty = v - v_t \quad (5)$$

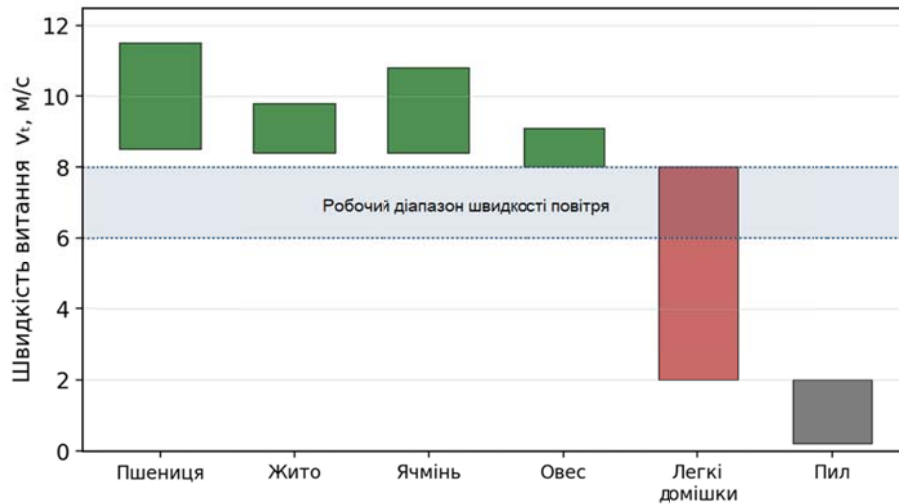


Рисунок 2 – Швидкість витання компонентів і робочий діапазон вертикального каналу
Джерело: розроблено автором

Усталений режим дає швидкість частинки $u_\infty = v - v_t$. Якщо $v_t < v$ (легка дрімка), $u_\infty > 0$ і частинка виноситься вгору; якщо $v_t > v$ (зерно), вона падає.

Характерний час релаксації (стабілізації) швидкості

$$\tau = \frac{1}{2k_p v_t} = \frac{v_t}{2g} \quad (6)$$

Таким чином, для зерна з $v_t \approx 9$ м/с, час релаксації швидкості становить близько 0,45 с. При цьому висота робочої зони має забезпечувати час перебування, не менший за кілька τ , інакше розділення неповне.

Перехідний процес для частинок різної парусності в потоці наведено на рис. 3.

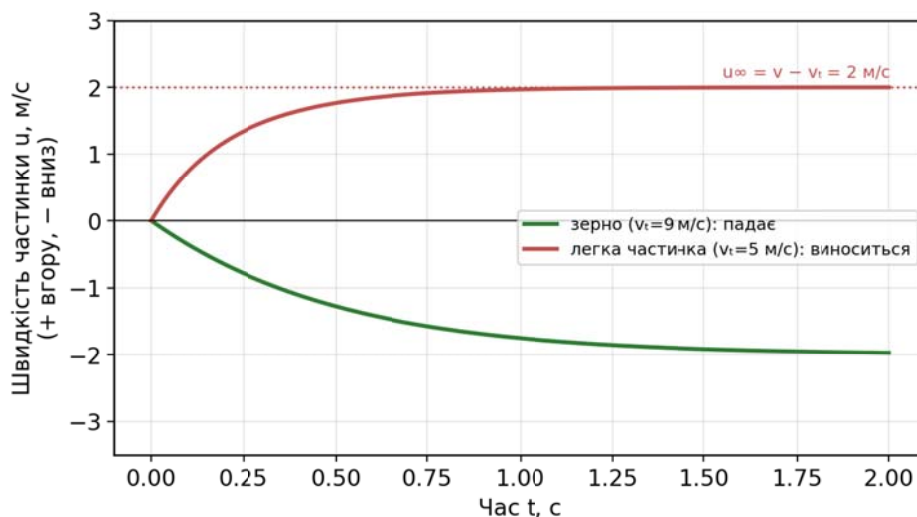


Рисунок 3 – Релаксація швидкості частинки у висхідному потоці ($v = 7$ м/с)
Джерело: розроблено автором

У горизонтальному каналі (рис. 16) частинка падає під дією сили тяжіння. При цьому повітря зі швидкістю v_h відхиляє її по горизонталі. Проекції рівняння руху мають вигляд

$$\ddot{x} = k_p(v_h - \dot{x})s, \quad \ddot{y} = g - k_p\dot{y}s, \quad s = \sqrt{(v_h - \dot{x})^2 + \dot{y}^2} \quad (7)$$

За малого зносу ($v_h \ll v_f$) горизонтальне відхилення за час падіння t_f з висоти h оцінюється як

$$\Delta x \approx \frac{1}{2} k_p v_h t_f^2, \quad t_f = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (8)$$

Відхилення прямо пропорційне парусності, тобто легкі частинки виносяться далі, ніж зерно, що й забезпечує розділення за дальністю польоту (рис. 4). Принциповим тут є те, що вертикальне переміщення матеріалу тут забезпечує сила тяжіння, а не повітря.

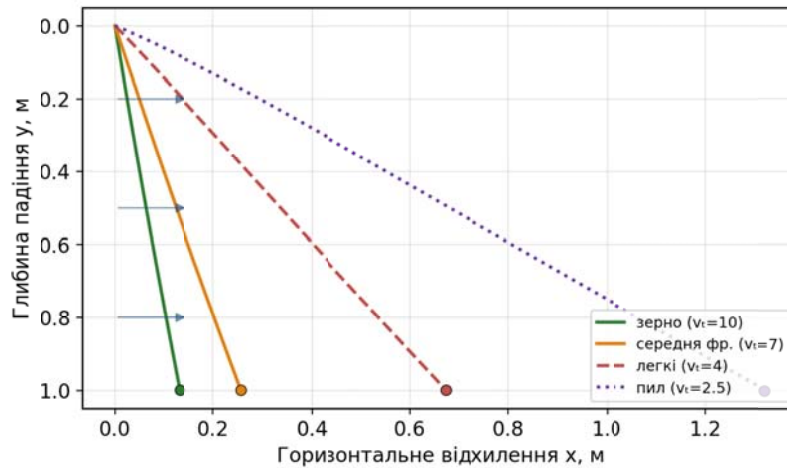


Рисунок 4 – Траєкторії частинок різної парусності в горизонтальному каналі ($v_h = 3,5$ м/с, $h = 1$ м)
Джерело: розроблено автором

Потужність на привід вентилятора визначає добуток витрат повітря на опір системи

$$N = \frac{Q \Delta p}{\eta}, \quad Q = v A, \quad \Delta p = \zeta \frac{\rho_a v^2}{2} \quad (9)$$

де A – площа перерізу каналу; ζ – сумарний коефіцієнт опору системи; η – ККД вентилятора.

Підстановка складових дозволяє отримати залежність

$$N = \frac{\zeta \rho_a A}{2\eta} v^3 \quad (10)$$

Потужність зростає як куб робочої швидкості повітря (рис. 5). Додатково у вертикальному каналі повітря виконує роботу проти сили тяжіння, виносячи легку фракцію масовою подачею $\dot{m}$:

$$N_{lev} \approx \dot{m}_\ell g \frac{H}{u} \quad (11)$$

У горизонтальній схемі ця складова відсутня. Тож відношення потужностей двох схем має вигляд

$$\frac{N_v}{N_h} = \frac{\zeta_v A_v}{\zeta_h A_h} \left(\frac{v_v}{v_h}\right)^3 \quad (12)$$

Як видно з рівняння, суттєвий приріст енергетики має куб відношення робочих швидкостей. При цьому, у вертикальному каналі $v_v \approx v_t$ (6–8 м/с), а в горизонтальному $v_h < v_t$ (3–4 м/с), енергоспоживання вертикальних каналів істотно вище.

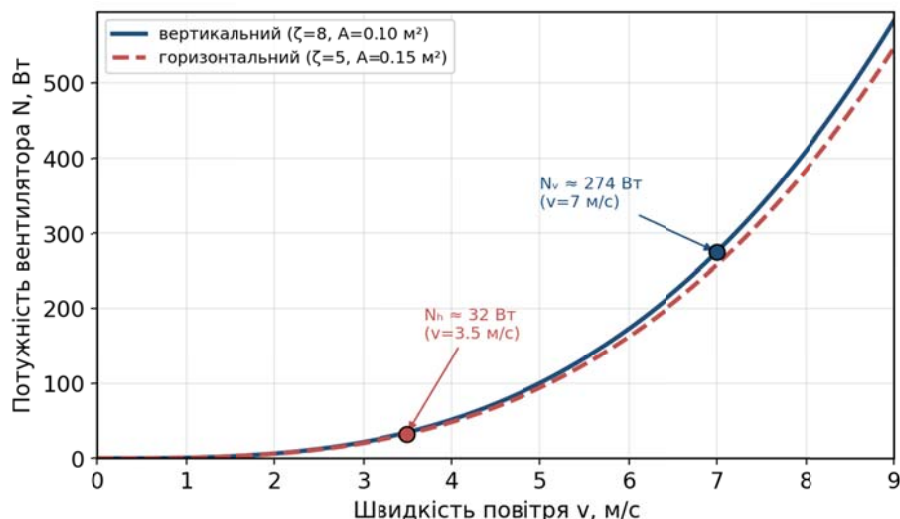


Рисунок 5 – Залежність потужності вентилятора від швидкості повітря з робочими точками обох схем
Джерело: розроблено автором

Експериментальні та теоретичні дослідження [11-23] підтверджують, що раціональна швидкість повітря в пневмосепаруючому каналі лежить у вузькому діапазоні: її надлишок різко збільшує енерговитрати і підвищує ризик виносу повноцінного зерна, а нестача погіршує виділення легких домішок. Зокрема, оптимізація режиму роботи пневмосепаратора методом поверхні відгуку дала раціональну швидкість повітря близько 5,4 м/с за помірної подачі матеріалу [24]. Це узгоджується з отриманими залежностями й підтверджує, що головним важелем енергоощадності є точне регулювання швидкості повітря відповідно до швидкості витання межового компонента, а не довільне її завищення «із запасом».

Висновки.

1. Енергетична відмінність вертикального та горизонтального повітряних каналів визначається робочою швидкістю повітря, оскільки потужність вентилятора зростає як її куб ($N \sim v^3$).
2. У вертикальному каналі робоча швидкість має наближатися до швидкості витання ($v_v \approx 6\text{--}8$ м/с) і не може бути суттєво зниженою без втрати ефекту; додатково повітря виконує роботу проти сили тяжіння, тому схема енергоємніша.
3. У горизонтальному каналі вертикальне переміщення забезпечує сила тяжіння, а повітря лише відхиляє частинки, що дозволяє працювати за $v_h < v_t$ (3–4 м/с) і знижує потужність у кілька разів (за оцінкою – у 5–9).
4. Перевагою вертикальної схеми є чіткіше розділення за єдиним параметром v_t і компактність, чим пояснюється її домінування в конструкціях.
5. Основними важелями енергозбереження є використання замкненого циклу руху повітря та мінімізація його швидкості у оптимізованих горизонтальних (похилих) схемах.

Список літератури

1. Абдуєв М. М. Обґрунтування параметрів сепаратора з нахиленим повітряним каналом для розділення зернових сумішей : дис. ... канд. техн. наук : 05.05.11 / Харківський держ. техн. ун-т сіл. госп-ва. Харків, 2007. 165 с.
2. Алієв Е. Б. Механіко-технологічні основи процесу прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.11 / ННЦ «ІМЕСГ». Глеваха, 2020. 530 с.
3. Котов Б. І., Степаненко С. П. Основи теорії та технології повітряної сепарації зернових матеріалів : монографія. Київ : ЦП «Компринт», 2023. 427 с.
4. Бакум М. В., Крекот М. М. Дослідження розсіювання компонентів насіннєвих сумішей овочевих культур у супутньому повітряному потоці. Механізація сільськогосподарського виробництва : Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка. Харків, 2013. Вип. 135. С. 359–363.
5. Кирпа М. Я., Скотар С. О., Рослик О. О. Дослідження процесу та параметрів аеродинамічного сепарування однокомпонентних насіннєвих сумішей. Зернові культури. 2019. Т. 3, № 2. С. 333–340.
6. Modeling of Aerodynamic Separation of Preliminarily Stratified Grain Mixture in Vertical Pneumatic Separation Duct / S. Kharchenko, Y. Borshch, S. Kovalyshyn, M. Piven, M. Abduev, A. Miernik, E. Popardowski, P. Kielbasa. Applied Sciences. 2021. Vol. 11, iss. 10. Art. 4383. DOI: 10.3390/app11104383.
7. Modeling the loading process of pneumatic separation channels / S. Kharchenko et al. Technology Audit and Production Reserves. 2024. Vol. 6, № 1 (80). P. 16–24.
8. Stepanenko S., Kotov B. To the Theory of Grain Motion in an Uneven Air Flow in a Vertical Pneumatic Separation Channel with an Annular Cross Section. Processes. 2022. Vol. 10, No. 10. Art. 1929. DOI: 10.3390/pr10101929.
9. Panasiewicz M., Sobczak P., Żukiewicz-Sobczak W. The Process of Separating Buckwheat and Wheat Grain Mixtures in an Air Stream. Processes. 2022. Vol. 10, No. 1. Art. 59. DOI: 10.3390/pr10010059.
10. Підвищення ефективності очищення зерна повітряним потоком / М. І. Васильковський, О. М. Васильковський, М. М. Косінов та ін. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. Кіровоград : КДТУ, 2004. Вип. 34. С. 84–88.
11. Попередні дослідження альтернативних джерел створення повітряного потоку в пневмоінерційних зерноочисних машинах / М. І. Васильковський, О. М. Васильковський, С. М. Лещенко та ін. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. Кіровоград, 2009. Вип. 39. С. 126–132.
12. Перспективний напрямок інтенсифікації повітряної сепарації зерна / О. В. Нестеренко, О. М. Васильковський, С. М. Лещенко, Д. І. Петренко, Д. В. Богатирьов. Збірник наукових праць КНТУ. Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація. 2012. Вип. 25, ч. 1. С. 49–53.
13. Енергетична оцінка роботи відцентрового повітряно-решітного сепаратора зерна / О. М. Васильковський, К. В. Васильковська, С. М. Мороз, М. О. Свірень. Fundamental and applied research in the modern world : abstracts of the 7th Intern. sci. and pract. conf. Boston, USA, 2021. P. 276–284.
14. Обґрунтування параметрів аспірації відцентрового пневморешітного сепаратора зерна / О. М. Васильковський, С. М. Лещенко, Д. І. Петренко, С. М. Мороз, А. С. Кожанова. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. Кіровоград, 2011. Вип. 41, ч. 2. С. 141–146.
15. Богомолов О. В. Наукове обґрунтування енергозберігаючих процесів та обладнання для сепарації харчової сипкої сировини : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.18.12 / Харківський держ. ун-т харчування та торгівлі. Харків, 2006. 36 с.
16. Шляхи зниження енергоємності процесів сепарації зернових сумішей / О. В. Богомолов, В. М. Михайлов, О. І. Завгородній та ін. Прогресивні техніка та технології харчових виробництв, ресторанного господарства та торгівлі. 2024. Вип. 1 (35). С. 165–179.
17. Васильковський М. І., Глобенко Г. О., Лещенко С. М. Дослідження повітряно-інерційної зерноочисної машини з вдосконаленим способом введення зернового матеріалу в пневмосепаруючий канал. Зернові продукти і комбікорми. 2008. № 3. С. 48–52.

18. Лещенко С. М. Результати експериментальних досліджень багатоструменевого способу введення матеріалу в повітряно-інерційних зерноочисних машинах замкнутого типу. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. Кіровоград, 2008. Вип. 38. С. 199–205.
19. Нестеренко О. В., Лещенко С. М., Петренко Д. І. Дослідження нерівномірності повітряного потоку в пневмосепаруючому каналі при багаторівневому введенні зерна. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка. Харків, 2015. Вип. 156. С. 35–42.
20. Aliiev E., Babyn I., Sokol S. Numerical Simulation of the Process of Aerodynamic Separation of Fine-Grained Bulk Material. Engineering, Energy, Transport AIC. 2023. Vol. 1, no. 120. P. 5–13. DOI: 10.37128/2520-6168-2023-1-1.
21. Теоретичні дослідження характеристик руху часток у нахиленому повітряному каналі при зміні характеристик епіюри швидкості повітря по висоті каналу / М. М. Абдуєв та ін. Механізація сільського господарства : Вісник ХДТУСГ. Харків, 2003. Вип. 24. С. 88–94.
22. Дослідження параметрів руху часток в плоскому нахиленому каналі пневматичного сепаратора / М. В. Бакум, В. П. Ольшанський, М. М. Крекот, М. О. Винокуров. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. 2015. Вип. 5, т. 2. URL: <https://nauka.tsatu.edu.ua/e-journals-tdata/pdf5t2/16.pdf>.
23. Васильковський М. І., Гончарова С. Я., Лещенко С. М. Обґрунтування параметрів сепарації зерна в похилому повітряному потоці. Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин : загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб. Кіровоград, 2007. С. 132–137.
24. Amrullah R. H., Dzulkifli M., Hajad M. Process Optimization of Pneumatic Separator Machine Using Response Surface Methodology. Proceedings of the 2nd International Conference on Smart and Innovative Agriculture (ICoSIA 2021). Advances in Biological Sciences Research. 2022. Vol. 19. P. 387–392. DOI: 10.2991/absr.k.220305.060.

References

1. Abduiev, M. M. (2007). Obgruntuvannia parametriv separatora z nakhylenym povitrianyim kanalom dlia rozdilennia zernovykh sumishei [Substantiation of the parameters of a separator with an inclined air channel for grain mixture separation] (PhD dissertation). Kharkiv State Technical University of Agriculture, Kharkiv. [in Ukrainian].
2. Aliiev, E. B. (2020). Mekhaniko-tekhnologichni osnovy protsesu pretsyziinoi separatsii nasinnievoho materialu soniashnyku [Mechanical and technological foundations of precision separation of sunflower seed material] (Doctoral dissertation). NSC IMESG, Hlevakha. [in Ukrainian].
3. Kotov, B. I., & Stepanenko, S. P. (2023). Osnovy teorii ta tekhnologii povitrianoi separatsii zernovykh materialiv [Fundamentals of the theory and technology of air separation of grain materials]. Kyiv: Komprynt. [in Ukrainian].
4. Bakum, M. V., & Krekot, M. M. (2013). Doslidzhennia rozsiuvannia komponentiv nasinnievyykh sumishei ovochevykh kultur u suputnomu povitrianomu pototsi [Study of scattering of vegetable seed mixture components in a co-current air flow]. Visnyk KhNTUSH, 135, 359–363. [in Ukrainian].
5. Kyrpa, M. Ya., Skotar, S. O., & Roslyk, O. O. (2019). Doslidzhennia protsesu ta parametriv aerodynamichnoho separuvannia odnokomponentnykh nasinnievyykh sumishei [Study of the process and parameters of aerodynamic separation of single-component seed mixtures]. Zernovi Kultury, 3(2), 333–340. [in Ukrainian].
6. Kharchenko, S., Borshch, Y., Kovalyshyn, S., Piven, M., Abduev, M., Miernik, A., Popardowski, E., & Kielbasa, P. (2021). Modeling of aerodynamic separation of preliminarily stratified grain mixture in vertical pneumatic separation duct. Applied Sciences, 11(10), 4383. <https://doi.org/10.3390/app11104383>
7. Kharchenko, S., et al. (2024). Modeling the loading process of pneumatic separation channels. Technology Audit and Production Reserves, 6(1(80)), 16–24.
8. Stepanenko, S., & Kotov, B. (2022). To the theory of grain motion in an uneven air flow in a vertical pneumatic separation channel with an annular cross section. Processes, 10(10), 1929. <https://doi.org/10.3390/pr10101929>
9. Panasiewicz, M., Sobczak, P., & Żukiewicz-Sobczak, W. (2022). The process of separating buckwheat and wheat grain mixtures in an air stream. Processes, 10(1), 59. <https://doi.org/10.3390/pr10010059>

10. Vasytkovskyi, M. I., Vasytkovskyi, O. M., Kosinov, M. M., et al. (2004). Pidvyshchennia efektyvnosti ochyshchennia zerna povitrianyim potokom [Improving the efficiency of grain cleaning by air flow]. *Konstruiuvannia, Vyrobnystvo ta Ekspluatatsiia Silskohospodarskykh Mashyn*, 34, 84–88. [in Ukrainian].
11. Vasytkovskyi, M. I., Vasytkovskyi, O. M., Leshchenko, S. M., et al. (2009). Poperedni doslidzhennia alternatyvnykh dzherel stvorennia povitrianooho potoku v pnevmoinertsiiynykh zernoochysnykh mashynakh [Preliminary studies of alternative air-flow sources in pneumatic-inertial grain cleaning machines]. *Konstruiuvannia, Vyrobnystvo ta Ekspluatatsiia Silskohospodarskykh Mashyn*, 39, 126–132. [in Ukrainian].
12. Nesterenko, O. V., Vasytkovskyi, O. M., Leshchenko, S. M., Petrenko, D. I., & Bohatyrov, D. V. (2012). Perspektyvnyi napriamok intensyfikatsii povitrianoi separatsii zerna [A promising direction for intensifying air separation of grain]. *Zbirnyk Naukovykh Prats KNTU*, 25(1), 49–53. [in Ukrainian].
13. Vasytkovskyi, O. M., Vasytkovska, K. V., Moroz, S. M., & Sviren, M. O. (2021). Enerhetychna otsinka roboty vidtsentrovoho povitriano-reshitnooho separatora zerna [Energy evaluation of a centrifugal air-sieve grain separator]. In *Fundamental and Applied Research in the Modern World: Proc. 7th Int. Sci. and Pract. Conf.* (pp. 276–284). Boston, USA. [in Ukrainian].
14. Vasytkovskyi, O. M., Leshchenko, S. M., Petrenko, D. I., Moroz, S. M., & Kozhanova, A. S. (2011). Obgruntuvannia parametriv aspiratsii vidtsentrovoho pnevmoreshitnooho separatora zerna [Substantiation of the aspiration parameters of a centrifugal pneumatic-sieve grain separator]. *Konstruiuvannia, Vyrobnystvo ta Ekspluatatsiia Silskohospodarskykh Mashyn*, 41(2), 141–146. [in Ukrainian].
15. Bohomolov, O. V. (2006). Naukove obgruntuvannia enerhozberihaiuchykh protsesiv ta obladnannia dlia separatsii kharchovoi sypkoi syrovyny [Scientific substantiation of energy-saving processes and equipment for separation of bulk food raw materials] (Extended abstract of Doctoral dissertation). Kharkiv State University of Food Technology and Trade, Kharkiv. [in Ukrainian].
16. Bohomolov, O. V., Mykhailov, V. M., Zavorodnii, O. I., et al. (2024). Shliakhy znyzhennia enerhoiemnosti protsesiv separatsii zernovykh sumishei [Ways to reduce the energy intensity of grain mixture separation processes]. *Prohresyvni Tekhnika ta Tekhnolohii Kharchovykh Vyrobnystv, Restorannoho Hospodarstva ta Torhivli*, 1(35), 165–179. [in Ukrainian].
17. Vasytkovskyi, M. I., Hlobenko, H. O., & Leshchenko, S. M. (2008). Doslidzhennia povitriano-inertsiiinoi zernoochysnoi mashyny z vdoskonalenym sposobom vvedennia zernovoho materialu v pnevmoseparuiuchy kanal [Study of an air-inertial grain cleaning machine with an improved method of feeding grain into the pneumatic separation channel]. *Zernovi Produkty i Kombikormy*, 3, 48–52. [in Ukrainian].
18. Leshchenko, S. M. (2008). Rezultaty eksperymentalnykh doslidzen bahatostruminevoho sposobu vvedennia materialu v povitriano-inertsiiynykh zernoochysnykh mashynakh zamknenoho typu [Results of experimental studies of the multi-jet method of material feeding in closed-type air-inertial grain cleaning machines]. *Konstruiuvannia, Vyrobnystvo ta Ekspluatatsiia Silskohospodarskykh Mashyn*, 38, 199–205. [in Ukrainian].
19. Nesterenko, O. V., Leshchenko, S. M., & Petrenko, D. I. (2015). Doslidzhennia nerivnomirnosti povitrianooho potoku v pnevmoseparuiuchomu kanali pry bahatorivnevomu vvedenni zerna [Study of air flow non-uniformity in a pneumatic separation channel under multilevel grain feeding]. *Visnyk KhNTUSH*, 156, 35–42. [in Ukrainian].
20. Aliiev, E., Babyn, I., & Sokol, S. (2023). Numerical simulation of the process of aerodynamic separation of fine-grained bulk material. *Engineering, Energy, Transport AIC*, 1(120), 5–13. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2023-1-1>
21. Abduiev, M. M., et al. (2003). Teoretychni doslidzhennia kharakterystyk rukhu chastok u nakhylenomu povitrianomu kanali pry zmini kharakterystyk epiury shvydkosti povitria po vysoti kanalu [Theoretical study of particle motion characteristics in an inclined air channel under a varying air-velocity profile over the channel height]. *Visnyk KhDTUSH*, 24, 88–94. [in Ukrainian].
22. Bakum, M. V., Olshanskyi, V. P., Krekot, M. M., & Vynokurov, M. O. (2015). Doslidzhennia parametriv rukhu chastok v ploskomu nakhylenomu kanali pnevmatychnoho separatora [Study of particle motion parameters in a flat inclined channel of a pneumatic separator]. *Naukovyi Visnyk TDATU*, 5(2). Retrieved from <https://nauka.tsatu.edu.ua/e-journals-tdatu/pdf5t2/16.pdf> [in Ukrainian].
23. Vasytkovskyi, M. I., Honcharova, S. Ya., & Leshchenko, S. M. (2007). Obgruntuvannia parametriv separatsii zerna v pokhylomu povitrianomu pototsi [Substantiation of grain separation parameters in an

inclined air flow]. *Konstruiuvannia, Vyrobnystvo ta Ekspluatatsiia Silskohospodarskykh Mashyn*, 132–137. [in Ukrainian].

24. Amrullah, R. H., Dzulkifli, M., & Hajad, M. (2022). Process optimization of pneumatic separator machine using response surface methodology. In *Proc. 2nd Int. Conf. on Smart and Innovative Agriculture (ICoSIA 2021)*. *Advances in Biological Sciences Research*, 19, 387–392. <https://doi.org/10.2991/absr.k.220305.060>

Oleksii Vasylovskyi, Prof., PhD tech. sci.

Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Comparison of the Energetics of Vertical and Horizontal Air Channels of Grain Cleaning Machines

The purpose of the article is to compare, on a common physical basis, the energy performance of the two principal air-channel arrangements used in grain cleaning machines – the vertical aspiration channel, in which the air stream rises against gravity, and the horizontal (inclined) blowing channel, in which the air stream crosses the falling grain. The comparison is made for an equivalent separation task in order to reveal which arrangement is inherently more energy-efficient and why.

Both channels separate the grain mixture by the aerodynamic properties of its components, primarily the terminal (floating) velocity. Starting from the equation of motion of a particle in an air stream, with the drag force expressed through the floating coefficient, the steady states for both orientations were obtained. In the vertical channel the working air velocity must approach the terminal velocity of the boundary component (about 6–8 m/s), since light impurities are carried upward only when the air velocity exceeds their floating velocity, while sound grain falls under gravity; in addition, the air performs work against gravity to remove the light fraction. In the horizontal channel the vertical transport of the material is provided by gravity, and the air merely deflects the particles horizontally, so a substantially lower velocity (about 3–4 m/s) is sufficient. Since the fan power scales as the cube of the air velocity, this difference in required velocity is strongly amplified in energy consumption. A worked numerical example for an equivalent task gives a fan-power ratio of about 8.5 in favour of the horizontal arrangement, confirmed by the cubic law and supported by trajectory and velocity-relaxation analysis.

It is concluded that the vertical aspiration channel is energetically the more expensive arrangement, mainly because its working velocity is fixed near the terminal velocity and because the air lifts the light fraction against gravity, whereas the horizontal channel exploits gravity for vertical transport and therefore consumes several times less energy (by an estimate, 5–9 times). The advantage of the vertical channel that justifies its dominance in practice is the sharper separation governed by a single parameter and its compactness. The principal levers of energy saving are regulation of the air velocity and a closed-loop air circuit. Further research should experimentally verify the obtained energy relationships and optimise combined vertical–horizontal schemes.

pneumatic separation, aspiration channel, terminal velocity, floating coefficient, energy intensity, grain cleaning machine

Одержано (Received) 22.06.2026

Прорецензовано (Reviewed) 25.06.2026

Прийнято до друку (Approved) 26.06.2026