

МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 631.362.3

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2026.56.7-16>

С. П. Степаненко¹, ст. наук. співр., д-р техн. наук, Б. І. Котов², проф., д-р техн. наук, А. Я. Кузьмич¹, ст. досл., канд. техн. наук, В. О. Швидя¹, ст. досл., канд. техн. наук, В. І. Днесь¹, ст. досл., канд. техн. наук, Д. А. Волик¹

¹Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва Національної Академії Аграрних наук України, смт. Глеваха, Україна

²Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», Кам'янець-Подільський, Україна

e-mail: Stepanenko_s@ukr.net

Дослідження процесу очищення зерна на плоскорешітному сепараторі

Викладено результати експериментальних досліджень процесу очищення зернового матеріалу на пересувному плоскорешітному сепараторі з удосконаленою аспіраційною камерою. Дослідження проводилися з метою підвищення ефективності відокремлення легких домішок та зменшення втрат повноцінного зерна в аспіраційних каналах. У ході експериментів проаналізовано вплив основних конструктивних і режимних параметрів аспіраційної камери на показники очищення, зокрема швидкість повітряного потоку, подачу зернової суміші та геометричні характеристики камери. За результатами обробки експериментальних даних отримано рівняння регресії, що описують залежність ефективності очищення та процесу осадження легких домішок від досліджуваних факторів. Отримані залежності можуть бути використані для обґрунтування раціональних параметрів аспіраційної камери та оптимізації роботи пересувних плоскорешітних зерноочисних машин.

плоскорешітний сепаратор, аспіраційна камера, ефективність, пневмосепарація, осадження, осадження легких домішок, травмування зерна

Постановка проблеми. За сучасних умов трансформації аграрного сектору України відбуваються зміни у формах землеволодіння та структурі посівних площ. Унаслідок цього зросла кількість фермерських господарств, які обробляють відносно невеликі масиви зернових культур. Для очищення зерна, отриманого з таких площ, переважно застосовують мобільні зерноочисні агрегати, що забезпечують попереднє та основне очищення. Найпоширенішими є пересувні плоскорешітні машини з продуктивністю в межах 10–30 т/год.

Разом із тим експлуатація зазначеного обладнання супроводжується утворенням та викидом зернового пилу і легких домішок у навколишній робочий простір. Це негативно впливає на умови праці операторів, ускладнює обслуговування техніки та знижує її ергономічні показники. У зв'язку з цим розроблення та впровадження ефективних технічних рішень щодо локалізації й утилізації пилу та легких домішок у пересувних плоскорешітних машинах є актуальним науково-практичним завданням.

Аналіз досліджень та публікацій. У світовій практиці очищення зерна простежується тенденція до централізованої організації аспіраційних систем. Провідні виробники зерноочисного обладнання, зокрема Mäg (Німеччина), Бюлер (Швейцарія) та Хепт-Картер (США), зазвичай не оснащують окремі сепаратори індивідуальними аспіраційними камерами. Виділення та концентрація легких домішок у таких системах здійснюється централізовано, через єдиний аспіраційний вузол або окремий пиловловлювальний агрегат, що обслуговує групу машин [4, 12-16].

Перевагою такого підходу є уніфікація процесу очищення повітря та спрощення обслуговування системи в умовах великих зернопереробних підприємств [19]. Однак централізована схема має низку обмежень [18]. Зокрема, ускладнюється можливість індивідуального регулювання повітряних параметрів для кожного сепаратора залежно від його продуктивності, складу зернового вороху та фізико-механічних властивостей домішок. Крім того, ефективне функціонування централізованої аспірації потребує наявності комплексної системи машин очищення та відповідної інфраструктури, що економічно виправдано переважно на великих елеваторах або комбінатах хлібопродуктів. Для фермерських господарств із невеликими обсягами переробки зерна така система часто є надмірно складною й витратною [17-19].

На пересувних плоскорешітних сепараторах, які використовуються у малих та середніх господарствах, найчастіше застосовують аспіраційні камери двох основних конструктивних типів. Перший тип - гравітаційні камери, виконані у вигляді бункера з перегородкою, що змінює напрям руху повітряного потоку та забезпечує осадження легких часток під дією сили тяжіння. Другий тип – відцентрові камери, які мають центральну трубу та спіральну або похилу навивку для відведення виділених домішок під дією відцентрових сил [5-7].

Результати попередніх досліджень свідчать, що за показниками ефективності виділення легких домішок відцентрові камери не мають істотних переваг порівняно з гравітаційними аналогами. Водночас їх встановлення на пересувні зерноочисні машини може призводити до зміщення центра мас конструкції, що погіршує стійкість агрегату під час транспортування та підвищує ризик його перекидання. Це особливо критично для [1-2].

Разом із тим у науковій літературі недостатньо висвітлено питання оптимізації параметрів гравітаційних аспіраційних камер саме для пересувних плоскорешітних сепараторів. Бракує системних досліджень, спрямованих на встановлення раціональних геометричних розмірів, режимів руху повітря та умов осадження легких домішок з урахуванням змінної продуктивності машин. У зв'язку з цим подальші теоретичні та експериментальні дослідження у цьому напрямі є своєчасними та науково обґрунтованими.

Постановка завдання. Метою роботи є встановити закономірності впливу продуктивності плоскорешітного сепаратора на показники якості очищення зернових матеріалів та надати їх кількісну оцінку з метою визначення раціональних режимів її роботи.

Виклад основного матеріалу. З метою підвищення ефективності вилучення та локалізації легких домішок для експериментального плоскорешітного сепаратора було розроблено та виготовлено удосконалену аспіраційну камеру. Конструктивні рішення базувалися на результатах попередніх теоретичних і експериментальних досліджень, виконаних у ІМА АПВ НААН. Розроблена камера призначена для інтенсифікації процесу відокремлення легких фракцій без істотного ускладнення конструкції машини та без зміщення її центру мас.

Конструкція камери включає корпус, завантажувальний бункер, скатні полиці, напрямні канали, осадну камеру, обичайки, збиральні полиці, вентилятор, шнековий транспортер та систему вихідних каналів. Аспіраційний вузол встановлювався безпосередньо над решітними станами експериментального сепаратора, що забезпечувало поєднання повітряного та решітного способів очищення в єдиному технологічному циклі.

Технологічний процес відбувався таким чином. Зернова суміш із завантажувального бункера самопливом надходила на скатні поверхні. Під час руху

вниз матеріал потрапляв у похилий повітряний потік, сформований вентилятором. Завдяки більшій масі та меншому аеродинамічному опору повноцінне зерно випадало вниз і надходило на подальше очищення решетами. Легкі домішки, що характеризуються вищим коефіцієнтом аеродинамічного опору, захоплювалися повітряним потоком і транспортувалися через напрямні канали до осадної камери.

В осадній камері за рахунок спеціальної геометрії обичайок змінювався напрям руху повітряного потоку. У зоні повороту швидкість повітря зменшувалася, що призводило до зниження підйомної аеродинамічної сили. У результаті цього легкі домішки осідали та накопичувалися на збиральних полицях, звідки за допомогою шнека відводилися до вивідного каналу. Така схема забезпечувала поетапне відокремлення фракцій і зменшення повторного захоплення осілих часток.

Для оцінки ефективності запропонованої конструкції було проведено однофакторний експеримент, у якому досліджувався вплив продуктивності плоскорешітного сепаратора q на показники технологічної ефективності очищення $E, \%$ та осадження легких домішок $E_k, \%$. У досліджах використовували навішування зернової суміші масою 60 кг із вмістом легких домішок 3 %. Продуктивність регулювали зміною положення заслінки завантажувального бункера в межах 0,4–9,6 т/год.

Для кількісного обліку легких домішок, винесених повітряним потоком через вентилятор, на його нагнітальний канал встановлювали тканинний рукав довжиною 2 м, що забезпечував повне вловлювання часток. Отримані експериментальні дані дали змогу встановити характер зміни ефективності процесу залежно від продуктивності та визначити раціональні режими роботи аспіраційної камери з урахуванням компромісу між інтенсивністю очищення та стабільністю повітряного потоку.

Ефективність очищення E , рахували за формулою:

$$E = \frac{m_1 + m_2 - m_3}{m \cdot \varepsilon}, \quad (1)$$

де m – маса наважки, кг;

ε – засміченість, %;

m_1 – маса легких домішок виділених аспіраційною камерою, кг;

m_2 – маса легких домішок у мішку, кг;

m_3 – маса зерна у фракціях виділених мішком і аспіраційною камерою, кг.

Ефективність осадження легких домішок E_k , рахували за формулою:

$$E_k = \frac{m_1}{m_1 + m_2}, \quad (2)$$

План реалізації експерименту представлений в таблиці 1.

Отримані експериментальні дані апроксимували поліномом другого степеня. Рівняння регресії ефективності очищення E і ефективності осадження легких домішок аспіраційною камерою від продуктивності плоскорешітного сепаратора q прийняли вигляд:

$$E = 72,223 - 7,1473 \cdot q + 0,2641 \cdot q^2, \quad (3)$$

$$E_k = 68,473 + 3,9712 \cdot q - 0,5033 \cdot q^2. \quad (4)$$

Таблиця 1 – Рівні незалежних факторів експериментальних досліджень

Продуктивність сепаратора, т/год	Ефективність очищення від легких домішок, %	Ефективність осадження легких домішок, %
0,4	69,3	70,0
4	49,6	76
4,4	44,2	76,5
9,6	28	60,2

Джерело: розроблено авторами

На основі рівняння 3 та даних табл. 1 побудований графік залежності ефективності очищення від легких домішок E від продуктивності сепаратора q (рис. 1).

Графік показує, що з підвищенням продуктивності q ефективність пневмосепарації знижується, що пояснюється погіршенням умов виділення легких домішок. Максимальної ефективності сепарації 72 % можна досягти при мінімальних значеннях продуктивності.

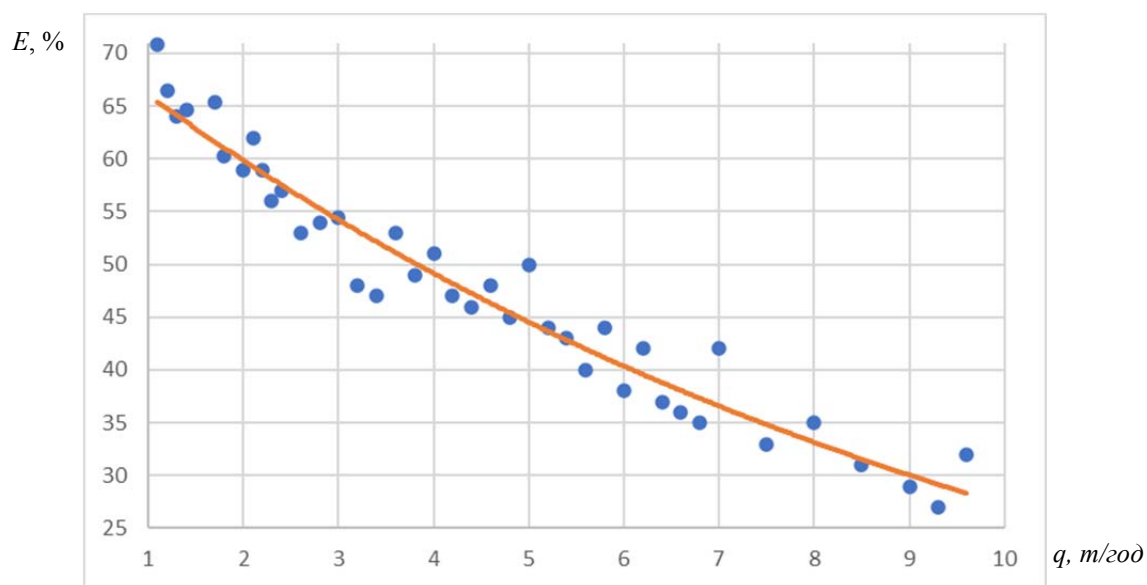


Рисунок 1 – Графік залежності технологічної ефективності пневмосепарації модернізованої аспіраційної камери від продуктивності сепаратора q .

Джерело: розроблено авторами

На основі рівняння 4 та даних табл. 1 побудований графік залежності ефективності осадження легких домішок E_k від продуктивності сепаратора q (рис. 2).

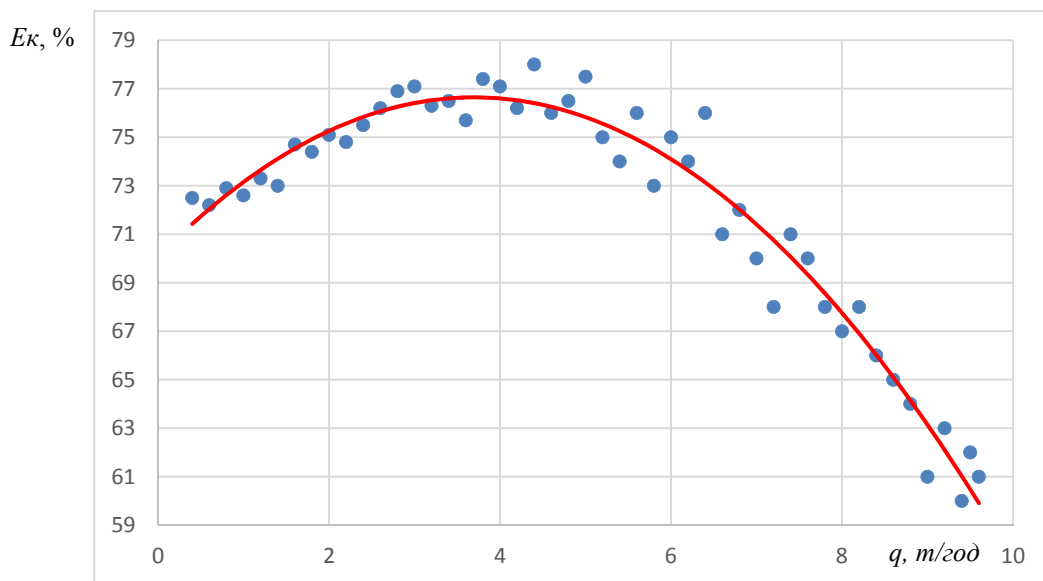


Рисунок 2 – Графік залежності технологічної ефективності осадження легких домішок E_k , % аспіраційною камерою плоскорешітного сепаратора від продуктивності сепаратора q .

Джерело: розроблено авторами

Аналіз даного графіка показує, що функція має екстремум в точці 3,95 /год. Цьому значенню продуктивності відповідає найбільше значення ефективності осадження 76,3%. Дану зону можна пояснити тим, що при збільшенні продуктивності плоскорешітного сепаратора q зменшується кількість виділених легких домішок, тобто їх концентрація (рис. 3). Зменшення концентрації легких домішок поліпшує умови осадження, але при збільшенні концентрації легких домішок у потоці повітря підвищується швидкість повітряного потоку між частками і як наслідок зниження швидкості повітряного потоку на повороті в деяких зонах виявляється недостатнім. Подальше зниження концентрації легких домішок у повітряному потоці теж негативно сприяє осадженню, так як при малій концентрації легких домішок у повітряному потоці збільшується динамічний тиск, який обмежує нижню границю швидкості повітряного потоку на повороті.

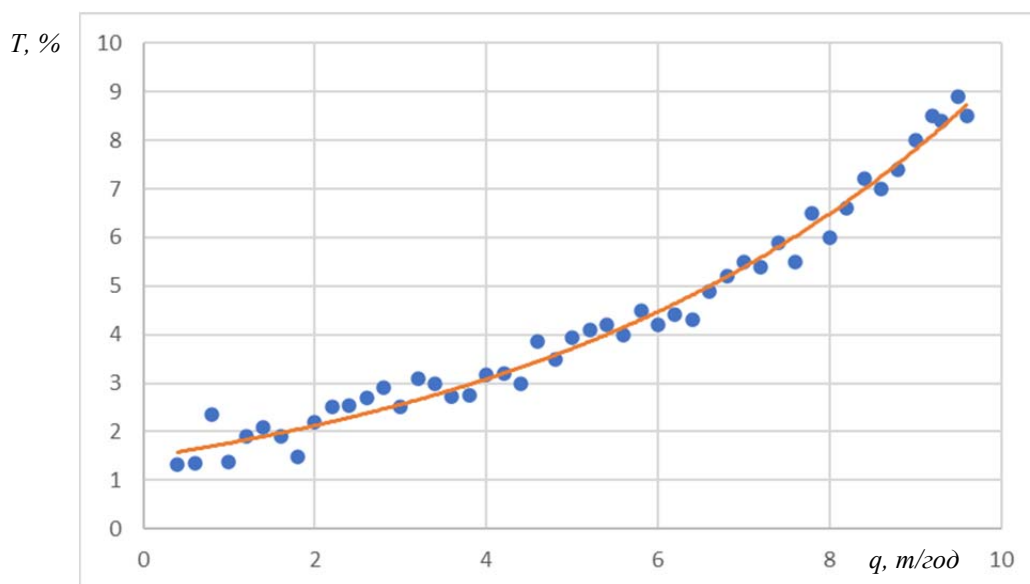


Рисунок 3 – Залежність відсотка травмування зерна від продуктивності машини

Джерело: розроблено авторами

Аналіз наведеного графіка показує, що зі збільшенням продуктивності сепаратора q спостерігається стійке зростання рівня травмування зерна. У досліджуваному діапазоні продуктивності функція має монотонно зростаючий характер без вираженого екстремуму. Мінімальне значення травмування (близько 1,5–2,0 %) відповідає найменшій продуктивності 0,4 т/год, тоді як при підвищенні продуктивності до 9,6 т/год рівень травмування досягає максимальних значень порядку 6,5 %.

Такий характер залежності можна пояснити тим, що зі зростанням продуктивності збільшується інтенсивність взаємодії зернового матеріалу з робочими органами та між собою. Підвищення масової подачі призводить до зростання щільності зернового потоку, збільшення кількості контактів і ударних навантажень між частками, а також до підвищення швидкостей переміщення зерна в аспіраційній камері. У результаті зростає механічне навантаження на зернівки, що спричиняє підвищення їх пошкодження.

Апроксимація отриманої залежності травмування зерна від продуктивності сепаратора квадратичним поліномом має вигляд:

$$T = 1,3245 + 0,4343 \cdot q + 0,0109 \cdot q^2, \quad (5)$$

де T - рівень травмування зерна, %; q - продуктивність сепаратора, т/год.

Отримане рівняння описує зростаючий характер функції, причому додатний коефіцієнт при q^2 свідчить про прискорене зростання травмування при підвищенні продуктивності в зоні великих навантажень.

Крім того, при більших значеннях продуктивності змінюється структура повітряного потоку: збільшується турбулентність і нерівномірність розподілу швидкостей, що додатково посилює динамічний вплив на зерновий матеріал. Таким чином, підвищення продуктивності сепаратора супроводжується зростанням травмування зерна, що обумовлює необхідність вибору раціонального режиму роботи обладнання з урахуванням компромісу між продуктивністю та збереженням якості зерна.

Рекомендації щодо подальших досліджень та удосконалення конструкції будуть наступними. Рекомендується виконати чисельне моделювання повітряного потоку (CFD-моделювання) для аналізу розподілу швидкостей, зон турбулентності та тиску в камері. Це дасть змогу зменшити енергетичні витрати вентилятора та мінімізувати вторинне захоплення осілих часток. Комплексна багатофакторна оптимізація. Подальші дослідження варто спрямувати на одночасне врахування трьох критеріїв: ефективності очищення E , ефективності осадження E_k та рівня травмування T . Доцільно застосувати методи планування експерименту другого порядку або методи багатокритеріальної оптимізації для визначення раціональної області режимів роботи.

Необхідно дослідити вплив швидкості повітряного потоку, висоти падіння зерна та конструкції напрямних поверхонь на рівень механічного пошкодження. Перспективним є застосування демпфуючих покриттів або зміненої конфігурації скатних елементів.

Доцільно виконати аналіз питомих енерговитрат на процес аспірації та визначити співвідношення «ефективність очищення - енерговитрати». Це особливо важливо для мобільних установок, що працюють у польових умовах.

Перспективним напрямом є впровадження датчиків запиленості та автоматичного керування швидкістю вентилятора залежно від продуктивності та

складу вороху. Це забезпечить стабільність технологічного процесу в умовах змінного навантаження.

Загалом подальші дослідження мають бути спрямовані на комплексне вдосконалення аеродинамічної схеми аспіраційної камери з одночасним підвищенням ефективності очищення, зменшенням травмування зерна та зниженням енергетичних витрат.

Висновки. У результаті проведених експериментальних досліджень встановлено кількісні залежності ефективності очищення E та ефективності осадження легких домішок E_k від продуктивності плоскорешітного сепаратора q . Отримані регресійні моделі (3) та (4), апроксимовані поліномами другого ступеня, адекватно описують характер зміни досліджуваних показників у діапазоні 0,4 -9,6 т/год.

Встановлено, що зі зростанням продуктивності сепаратора загальна ефективність очищення від легких домішок зменшується. Максимальне значення показника E (приблизно 72 %) досягається при мінімальній продуктивності. Подальше збільшення подачі зернової суміші погіршує умови пневмосепарації внаслідок зростання навантаження на повітряний потік і зниження стабільності процесу виділення легких фракцій.

Залежність ефективності осадження легких домішок E_k від продуктивності має екстремальний характер. Найвище значення $E_k=76,3\%$ відповідає продуктивності близько 3,95 т/год, що свідчить про існування раціонального режиму роботи аспіраційної камери. Відхилення від цієї зони як у бік зменшення, так і збільшення продуктивності призводить до зниження ефективності осадження через зміну концентрації домішок у повітряному потоці та порушення оптимальних умов зниження швидкості в зоні повороту потоку.

Дослідження впливу продуктивності на рівень травмування зерна показало монотонне зростання цього показника зі збільшенням qq . Мінімальний рівень пошкодження (1,5-2,0 %) спостерігається при найменшій продуктивності, тоді як при 9,6 т/год травмування досягає близько 6,5 %. Отримане рівняння (5) підтверджує прискорене зростання травмування при високих навантаженнях, що зумовлено підвищенням щільності зернового потоку, інтенсивністю контактів та турбулентністю повітряного середовища.

Узагальнюючи результати, можна зробити висновок, що підвищення продуктивності сепаратора супроводжується суперечливим впливом на якісні показники роботи: з одного боку знижується загальна ефективність очищення та зростає травмування зерна, з іншого – існує оптимальна зона продуктивності, в якій досягається максимальна ефективність осадження легких домішок.

Отже, раціональний режим роботи аспіраційної камери доцільно обирати з урахуванням компромісу між продуктивністю, ефективністю очищення та збереженням цілісності зерна. Оптимальною з технологічної точки зору є зона продуктивності близько 4 т/год, яка забезпечує високий рівень осадження легких домішок при допустимому рівні травмування зерна.

Список літератури

1. Богатирьов Д. В. Скриннік І. О., Юрченко О. В. Обґрунтування технологічних параметрів зернового сепаратора. *Конструювання виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2019. Вип. 49. С. 34–42. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2019.49.34-42>

2. Васильковський О. М., Лещенко С. М., Нестеренко О. В., Петренко Д. І., Якименко С. М. Обґрунтування конструктивної схеми пневморешітного сепаратора зерна. *Конструювання виробництва та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2021. Вип. 51. С. 104–110. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.104-110>
3. Степаненко С. П., Котов Б. І., Волик Д. А., Мельник В. А. Дослідження процесів руху та розділення компонентів насіннєвих сумішей у вібропневматичному середовищі. *Віб्राції в техніці та технологіях*. 2024. № 2(113). С. 14–23. DOI: <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-2-2>
4. Васильковський О.М., Лещенко С.М., Мороз С.М., Нестеренко О.В., Молокост Л.А. До створення концепції «ідеального» решета зернового сепаратора. *Конструювання виробництва та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2020. Вип. 52. С. 52–58. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.52-58>
5. Котов Б., Степаненко С., Калініченко Р. Теоретичне обґрунтування руху частинки зерна на вібропневморешеті при дії розпушуючих робочих органів. *Науковий вісник Національного аграрного університету*. 2007. Т. 115. С. 112–117.
6. Ольховський В.О., Дударев І.М. Способи сепарування та сепаратори зернової маси. Сільськогосподарські машини. 2021. №47. С. 102–112. DOI: <https://doi.org/10.36910/acm.vi47.655>
7. Brouwers J. J. H. Innovative Methods of Centrifugal Separation. *Separations*, 2023. Vol. 10(3), 181. DOI: <https://doi.org/10.3390/separations10030181>
8. Тищенко Л. Н., Харченко С. А. Дослідження процесу проходження частинок зернової суміші через отвори решіт вібраційних сепараторів. *Вісник аграрної науки*. 2013. № 7. С. 45–50.
9. Харченко С. О. Експериментальні дослідження повітропроникної розшаровуючої поверхні пневмосепаруючого пристрою зернових сепараторів. *Вісник ХНТУСГ*. 2015. Т. 156. С. 210–216.
10. Xing Q., Utami D. P., Demattey M. B., Kyriakopoulou K., de Wit M., Boom R. M., Schutyser M. A. I. A two-step air classification and electrostatic separation process for protein enrichment of starch-containing legumes. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2020. Vol. 66, 102480. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102480>
11. Meenakshi Sundaram G. S., Das D., Emiola-Sadiq T., Khan A. S., Zhang L., Meda, V. Developments in the Dry Fractionation of Plant Components: A Review. *Separations*. 2024. Vol. 11(12), 332. DOI: <https://doi.org/10.3390/separations11120332>
12. Kaas A., Mütze T., Peuker U. A. Review on Zigzag Air Classifier. *Processes*. 2022. Vol. 10, no. 4, 764. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr10040764>
13. Kharchenko S., Borshch Y., Kovalyshyn S., Piven M., Abduev M., Miernik A., Popardowski E., Kielbasa P. Modeling of Aerodynamic Separation of Preliminarily Stratified Grain Mixture in Vertical Pneumatic Separation Duct. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 10, 4383. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11104383>
14. Yuan J., Li H., Qi X., Hu T., Bai M., Wang Y. Optimization of airflow cylinder sieve for threshed rice separation using CFD-DEM. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 2020. Vol. 14(1), P. 871–881 DOI: <https://doi.org/10.1080/19942060.2020.1778540>
15. Shapiro M., Galperin V. Air classification of solid particles: A review. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2005. Vol. 44. P. 279–285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2004.02.022>
16. Швець О., Коруняк П. Підвищення ефективності просіювання зерна на віброрешітному електросепараторі. *Вісник ЛНУВ. Серія Агроінженерні дослідження*. 2023. Вип. 26, С. 64–70 DOI: <https://doi.org/10.31734/agroengineering2022.26.064>
17. Stepanenko, S., Kотов, B., Kuzmych, A., Kalinichenko, R., Hryshchenko, V. Research of the process of air separation of grain material in a vertical zigzag channel. *Journal of Central European Agriculture*. 2023. Vol. 24(1). P. 225–235. DOI: <https://doi.org/10.5513/JCEA01/24.1.3732>
18. Stepanenko S., Volyk D., Kuzmych A., Melnyk V. Theoretical study of grain particle movement in vibro-aerodynamic field. *Proceeding of 24th International Scientific Conference Engineering for Rural Development*, May 21–23 2025, Jelgava, 2025. Vol. 24. P. 1091–1096. DOI: <https://doi.org/10.22616/ERDev.2025.24.TF278>

References

1. Bohatyrov, D.V. Skrynnik, I.O., & Yurchenko, O.V. (2019). Justification of technological parameters of a grain separator. *Design, Production and Exploitation of Agricultural Machines*, 49, 34–42 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2019.49.34-42>
2. Vasylovskiy, O.M., Leshchenko, S.M., Nesterenko, O.V., Petrenko, D.I., & Yakymenko, S.M. (2021). Justification of the design scheme of a pneumatic grain separator. *Design, Production and Exploitation of Agricultural Machines*, 51, 104–110 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2021.51.104-110>
3. Stepanenko, S. P., Kotov, B. I., Volyk, D. A., & Melnyk, V. A. (2024). Investigation of motion and separation processes of seed mixture components in a vibro-pneumatic environment. *Vibrations in Engineering and Technologies*, 2(113), 14–23 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2024-2-2>
4. Vasylovskiy, O. M., Leshchenko, S. M., Moroz, S. M., Nesterenko, O. V., & Molokost, L. A. (2020). Towards the development of the concept of an “ideal” sieve for a grain separator. *Design, Production and Exploitation of Agricultural Machines*, 52, 52–58 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.52-58>
5. Kotov, B., Stepanenko, S., & Kalinichenko, R. (2007). Theoretical substantiation of grain particle motion on a vibro-pneumatic sieve under the action of loosening working bodies. *Scientific Bulletin of the National Agrarian University*, 115, 112–117 [in Ukrainian].
6. Olkhovskiy, V.O., & Dudarev, I.M. (2021). Separation methods and separators of grain mass. *Agricultural Machines*, 47, 102–112 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.36910/acm.vi47.655>
7. Brouwers, J. J. H. (2023). Innovative Methods of Centrifugal Separation. *Separations*, 10(3), 181. <https://doi.org/10.3390/separations10030181>
8. Tyshchenko, L. N., & Kharchenko, S. A. (2013). Study of the process of grain mixture particle passage through sieve openings of vibratory separators. *Bulletin of Agrarian Science*, (7), 45–50 [in Ukrainian].
9. Kharchenko, S. O. (2015). Experimental studies of the air-permeable stratifying surface of a pneumatic separating device for grain separators. *Bulletin of KhNTUSG*, 156, 210–216 [in Ukrainian].
10. Xing, Q., Utami, D. P., Demattey, M. B., Kyriakopoulou, K., de Wit, M., Boom, R. M., & Schutyser, M. A. I. (2020). A two-step air classification and electrostatic separation process for protein enrichment of starch-containing legumes. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 66, 102480. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102480>
11. Meenakshi Sundaram, G. S., Das, D., Emiola-Sadiq, T., Khan, A. S., Zhang, L., & Meda, V. (2024). Developments in the dry fractionation of plant components: A review. *Separations*, 11(12), 332. <https://doi.org/10.3390/separations11120332>
12. Kaas, A., Mütze, T., & Peuker, U. A. (2022). Review on zigzag air classifier. *Processes*, 10(4), 764. <https://doi.org/10.3390/pr10040764>
13. 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 a vertical pneumatic separation duct. *Applied Sciences*, 11(10), 4383. <https://doi.org/10.3390/app11104383>
14. Yuan, J., Li, H., Qi, X., Hu, T., Bai, M., & Wang, Y. (2020). Optimization of airflow cylinder sieve for threshed rice separation using CFD-DEM. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 14(1), 871–881. <https://doi.org/10.1080/19942060.2020.1778540>
15. Shapiro, M., & Galperin, V. (2005). Air classification of solid particles: A review. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 44, 279–285. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2004.02.022>
16. Shvets, O., & Koruniak, P. (2023). Increasing the efficiency of grain sieving on a vibrating sieve electric separator. *Bulletin of Lviv National Environmental University. Series Agroengineering Research*, (26), 64–70 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.31734/agroengineering2022.26.06>
17. 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. DOI: <https://doi.org/10.5513/JCEA01/24.1.3732>
18. Stepanenko, S., Volyk, D., Kuzmych, A., & Melnyk, V. (2025). Theoretical study of grain particle movement in vibro-aerodynamic field. *Engineering for Rural Development*, 24, 1091–1096. <https://doi.org/10.22616/ERDev.2025.24.TF278>

Serhii Stepanenko¹, Senior Researcher, DSc., **Borys Kotov**², Prof., DSc., **Alvian Kuzmych**¹, Senior Researcher, PhD tech. sci., **Viktor Shvydia**¹, Senior Researcher, PhD tech. sci., **Viktor Dnes**¹, Senior Researcher, PhD tech. sci., **Daryna Volyk**¹

¹*Institute of Mechanics and Automation of Agricultural Production, Hlevakha, Ukraine*

²*Institution of Higher Education "Podilskyi State University", Kamianets-Podilskyi, Ukraine*

Investigation of the Grain Cleaning Process in a Flat-Sieve Separator

The purpose of this paper is to experimentally investigate the process of cleaning grain materials in a mobile flat-sieve separator equipped with an improved gravity-type aspiration chamber. The study focuses on identifying the relationships between machine capacity and the efficiency of grain cleaning from light impurities, the efficiency of their deposition in the aspiration chamber, and the level of grain damage. An additional objective is to obtain mathematical relationships suitable for the engineering justification of rational operating modes of grain cleaning equipment. The obtained results are intended to improve the technological efficiency of mobile grain cleaning machines while maintaining grain quality.

The paper presents the results of experimental studies of the grain cleaning process in a mobile flat-sieve separator with an improved aspiration chamber installed directly above the sieve decks. The proposed design of the aspiration unit ensures the combination of sieve and pneumatic cleaning methods within a single technological cycle without significant complication of the machine design or displacement of its center of mass. The experiments were conducted using a single-factor experimental scheme with variation of the separator capacity in the range of 0.4–9.6 t/h. The evaluation criteria included the efficiency of grain cleaning from light impurities, the efficiency of their deposition in the aspiration chamber, and the level of grain damage. Based on the experimental results, the obtained data were approximated using second-order polynomials, and regression equations describing the variation of the studied indicators as functions of machine capacity were derived. An analysis of the obtained relationships was performed, graphs were constructed, and zones of rational operating modes of the aspiration chamber were identified.

The study revealed that an increase in the capacity of the flat-sieve separator leads to a decrease in the overall efficiency of grain cleaning from light impurities, while the efficiency of their deposition exhibits an extremal character. The maximum deposition efficiency is achieved at a capacity of approximately 4 t/h, indicating the existence of a rational operating zone for the aspiration chamber. A steady increase in the level of grain damage with increasing capacity was also observed, which limits the potential for intensifying the cleaning process. The obtained regression relationships can be used to select optimal operating modes of mobile flat-sieve separators, taking into account the trade-off between productivity, cleaning efficiency, and preservation of grain quality.

flat-sieve separator, aspiration chamber, cleaning efficiency, pneumatic separation, deposition of light impurities, grain damage

Одержано (Received) 29.05.2026

Прорецензовано (Reviewed) 18.06.2026

Прийнято до друку (Approved) 22.06.2026