

УДК 621.7

DOI: <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2025.55.80-90>

Г.В. Теслюк, доц., канд. техн. наук, **О.В. Золотовська**, доц., канд. техн. наук,
О.М. Кобець, доц., канд. техн. наук, **А.І. Ковцун**, здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти

Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна

e-mail: tesliuk.h.v@dsau.dp.ua

Моделювання аеродинамічних процесів очищення зернової маси в повітряному потоці

У статті розглянуто процес очищення зернової маси на основі аеродинамічного поділу компонентів у повітряному потоці. Наведено аналіз впливу основних параметрів пневмосепарувальних систем — швидкості повітряного потоку, морфологічних характеристик зерна, геометричних властивостей решіт — на ефективність очищення. Проведено експериментальні дослідження та математичне моделювання розподілу зернового вороху за аеродинамічними характеристиками та товщиною зерен. Встановлено, що процеси поділу підпорядковуються нормальному закону розподілу. Визначено оптимальні розміри отворів сортуючих решіт (2,4–2,6 мм) та повноту поділу ($\epsilon_b = 0,81$), які забезпечують мінімальні втрати повноцінного зерна та високу якість насінневого матеріалу. Отримані результати можуть бути використані для удосконалення конструкції та режимів роботи повітряно-решітних зерноочисних машин.

зернова маса, очищення, аеродинамічні властивості, пневмосепарація, швидкість повітряного потоку, нормальний розподіл, сортуєче решето

Постановка проблеми. Проблема ефективного очищення зернової маси є ключовою для забезпечення високої якості насінневого матеріалу та продовольчого зерна. З огляду на широке впровадження повітряно-решітних зерноочисних машин, особливої важливості набуває вивчення закономірностей руху частинок у повітряному потоці. Оптимізація параметрів повітряного очищення дозволяє мінімізувати втрати повноцінного зерна, зменшити енерговитрати, підвищити якість сортування та адаптувати технології до змінних властивостей зернового вороху. Тому дослідження аеродинамічних характеристик і математичне моделювання процесів сепарації є вкрай актуальними для сучасного аграрного виробництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аспіраційні системи можуть бути як складовими елементами зерноочисних машин, так і самостійними технологічними агрегатами. Принцип їхньої роботи ґрунтується на поділі зернової маси в повітряному потоці відповідно до відмінностей в аеродинамічних властивостях компонентів суміші [1].

Пневмосепарувальні системи є складними аеродинамічними комплексами, ефективність функціонування яких визначається такими параметрами, як швидкість повітряного потоку, якість вихідного вороху, швидкість подачі матеріалу, кут нахилу потоку, питоме навантаження зерна, рівномірність швидкісного поля, а також тривалість контакту очищуваного матеріалу з повітряним середовищем [2].

Аеродинамічні характеристики зернових сумішей оцінюються за показниками швидкості вітання, що є відносною швидкістю повітряного потоку, за якої частинка перебуває у стані рівноваги, або коефіцієнтом парусності. Значення швидкості вітання зерна і домішок значно відрізняються, що пояснюється різною масою, густиною, розмірами та формою частинок. Під парусністю розуміють здатність частинок зернової

маси чинити опір повітряному потоку. Даний параметр є визначальним під час сепарації зернової суміші та залежить від морфологічних особливостей поверхні, форми частинок і характеристик повітряного потоку. Кожна з фракцій зернового вороху характеризується індивідуальними показниками мінімальної та максимальної швидкості вітання [3].

На основі теоретичних досліджень встановлено, що рівномірний повітряний потік забезпечує оптимальні умови для розподілу зернового вороху [4]. Однак, у промислових умовах створити такий потік не завжди можливо. Під час сепарації швидкість повітряного потоку регулюють відповідно до критерію винесення повноцінного зерна у відходи, що передбачає допустимі втрати на рівні:

- попереднього очищення – 0,2%,
- первинного очищення – 0,5%,
- вторинного очищення – 3,0%.

Для отримання якісного насінневого матеріалу та продовольчого зерна необхідно здійснювати очищення зернової маси безпосередньо після її надходження від комбайна. Оптимальним підходом є поділ вороху на три основні фракції: основну (насінову або продовольчу), відходову та фуражну [5]. Даний процес реалізується шляхом застосування повітряно-решітних зерноочисних машин, де розподіл частинок у повітряному потоці базується на відмінностях їхніх аеродинамічних характеристик. При відносному переміщенні в повітрі частинка зазнає опору, величина якого залежить від її форми, поверхневих властивостей, маси та орієнтації у повітряному потоці [6].

Аеродинамічні властивості частинок визначають їхню здатність до переміщення під дією повітряного потоку. Чим більший опір чинить частинка, тим нижчою є її швидкість руху, що зумовлює швидше осідання.

Очищення зерна за допомогою повітряних систем має низку переваг у порівнянні з іншими методами, зокрема:

- високу питому продуктивність,
- простоту конструкції,
- низьку собівартість,
- мінімальне травмування зерна.

Масові дослідження засвідчують, що застосування аеродинамічних методів очищення дозволяє ефективно видаляти до 75 % небажаних домішок із зернової маси [7].

Системи повітряного очищення є невід'ємною частиною зерноочисних машин і включають такі основні елементи:

- один або два пневмосепарувальні канали, в яких здійснюється поділ зернової суміші,
- вентилятори для створення необхідного повітряного потоку,
- додаткові регулювальні пристрої для корекції швидкості повітряного потоку,
- механізми для відділення легких домішок із повітря,
- засоби введення та виведення зернової маси,
- з'єднувальні компоненти.

Постановка проблеми. Метою даного дослідження є встановлення закономірностей аеродинамічного поділу зернової маси та визначення оптимальних параметрів пневмосепарувальних систем, що забезпечують підвищення ефективності очищення зерна.

Виклад основного матеріалу. У процесі сепарації швидкість повітряного потоку регулюють з урахуванням критерію мінімізації втрат повноцінного зерна. У

випадку очищення пшениці у пневмосепарувальних каналах швидкість повітряного потоку зазвичай становить 6–11 м/с [8,9].

Розподіл зернової маси пшениці відповідно до швидкості повітряного потоку здійснювали на пристрою, який призначений для попереднього очищення та класифікації зерна або іншої сільськогосподарської продукції за фракціями із використанням мікроманометра та трубки Піто-Прандтля. В ході експериментальних досліджень додатково визначали такий важливий показник якості, як маса 1000 зерен. Результати розподілу зернового вороху пшениці у повітряному потоці та значення маси 1000 зерен наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Розподіл зернового вороху пшениці повітряним потоком

Швидкість повітряного потоку, м/с	Виділення зернового вороху, %	Маса 1000 зерен, г
6,91	1,9	15,29
7,47	1,8	18,79
8,01	3,02	23,29
8,48	5,56	24,69
8,91	7,19	27,39
9,37	15,89	35,79
9,79	43,88	39,59
10,19	18,75	42,19
10,56	1,80	46,39

Джерело: розроблено авторами

Згідно з наведеними у таблиці даними, зі збільшенням швидкості повітряного потоку від 6,93 м/с до 9,80 м/с інтенсивність виділення зернового вороху поступово зростає, після чого різко зменшується. Повне відокремлення зернової маси спостерігається при швидкості потоку 10,58 м/с.

Максимальний вихід зернового вороху зафіксований при швидкостях 9,38; 9,80 та 10,20 м/с, що становить 78,55 %. Однак зерно, виділене за швидкостей у межах 6,93–8,94 м/с, характеризується низькою масою 1000 зерен (менше 30 г), що свідчить про його біологічну неповноцінність. Таке зерно має бути повністю вилучене за допомогою пневмоаспіраційних систем повітряно-решітних зерноочисних машин.

У повітряно-решітних зерноочисних машинах зернова маса розділяється не лише за аеродинамічними властивостями, а й за розмірами зерен. Для аналізу процесу фракціонування зернового вороху за розмірами розглянемо вихідний матеріал, отриманий від комбайнів, який піддавався лабораторному розсіву за допомогою установки ЕРЛ (Електророзсів Лабораторний). Сита з інтервалом розмірів отворів 0,2 мм дозволили визначити склад фракцій зернового вороху пшениці, зібраної комбайном John Deere 9660.

У повітряно-решітних зерноочисних машинах процес розподілу зернового вороху базується на двох ключових принципах. Перш за все, це аеродинамічні властивості зерен, які визначають, як частинки взаємодіють з повітряним потоком: легші та більш обтічні зерна піднімаються або відносяться повітрям, тоді як важчі швидше осідають. Другим важливим фактором є геометричні параметри зерен — зокрема, їхній розмір і форма. Саме ці характеристики впливають на здатність зерен проходити крізь сита відповідного калібру. Завдяки поєднанню цих двох критеріїв відбувається ефективно сортування та очищення зернової маси від домішок.

Оптимальне налаштування зерноочисних машин на фракціонування забезпечується регулюванням швидкості повітряного потоку та правильним вибором сит. Для цього необхідно знати закономірності розподілу зернового вороху за аеродинамічними характеристиками, що дає можливість визначити оптимальну швидкість повітряного потоку, а також за розмірами, що забезпечує підбір відповідних решіт.

У першій аспіраційній стадії повітряно-решітних зерноочисних машин вилучаються легкі та незернові домішки, які спрямовуються до відходової фракції. Після цього зернова маса потрапляє на решітний стан, де на сортувальних ситах відбувається її поділ за товщиною. На другому аспіраційному етапі, при підвищеній швидкості повітряного потоку, з основної фракції видаляються біологічно неповноцінні щуплі зернівки, які можуть бути використані лише для кормових потреб.

Для побудови теоретичної моделі розподілу зернового вороху необхідно визначити, який статистичний закон найкраще описує емпіричні дані. Існує значна кількість математичних моделей, що відрізняються за методами обчислення та рівнем деталізації, і які використовуються для вирішення завдань, пов'язаних із аналізом розподілу частинок [12].

Математичний опис випадкових величин передбачає визначення закону розподілу, що встановлює зв'язок між значеннями випадкової величини та ймовірністю їхнього прояву. Для повного ймовірнісного опису процесу необхідно задати цей закон, тобто визначити відповідну функцію розподілу. Закон розподілу випадкової величини встановлює залежність між можливими значеннями параметрів зернового вороху та ймовірностями їхнього виникнення.

Більшість методів обробки даних базуються на припущенні, що розподіл значень має нормальний характер або близький до нього. Вважається, що розподіл зернового вороху за аеродинамічними характеристиками та товщиною зерен підпорядковується нормальному закону розподілу.

Для подальшого аналізу є обчислення необхідних характеристик для визначення закону розподілу за товщиною зерен. Середню товщину зерен вихідного вороху можна визначити за такою формулою:

$$M_b = \sum_{i=1}^n b_{icp} P_{bi}, \quad (1)$$

де P_{bi} – частка вороху з кожного i -го решета;

b_{icp} – середня товщина зернівок кожного i -го класу., мм.

$$b_{icp} = \frac{b_{p(i+1)} + b_{p_i}}{2}, \quad (2)$$

де b_{p_i} і $b_{p(i+1)}$ – ширина отворів решета, на якому знаходиться зерно, та попереднього відповідно, мм.

Середньоквадратичне відхилення товщини зернівок визначається наступним чином:

$$\sigma_b = \sqrt{\sum_{i=1}^n (b_{icp} - M_b)^2 P_{bi}}. \quad (3)$$

Теоретична вірогідність потрапляння зернівок на відповідне решето:

$$P_{bi} = \Phi\left(\frac{b_{i+1} - M_b}{\sigma_b}\right) - \Phi\left(\frac{b_i - M_b}{\sigma_b}\right), \quad (4)$$

де $\Phi(x)$ – інтегральна нормальна функція розподілу (функція Лапласа)

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt . \quad (5)$$

На рисунку 1 наведені експериментальна та теоретична залежності розподілу зернівок вихідного зернового вороху пшениці за товщиною.

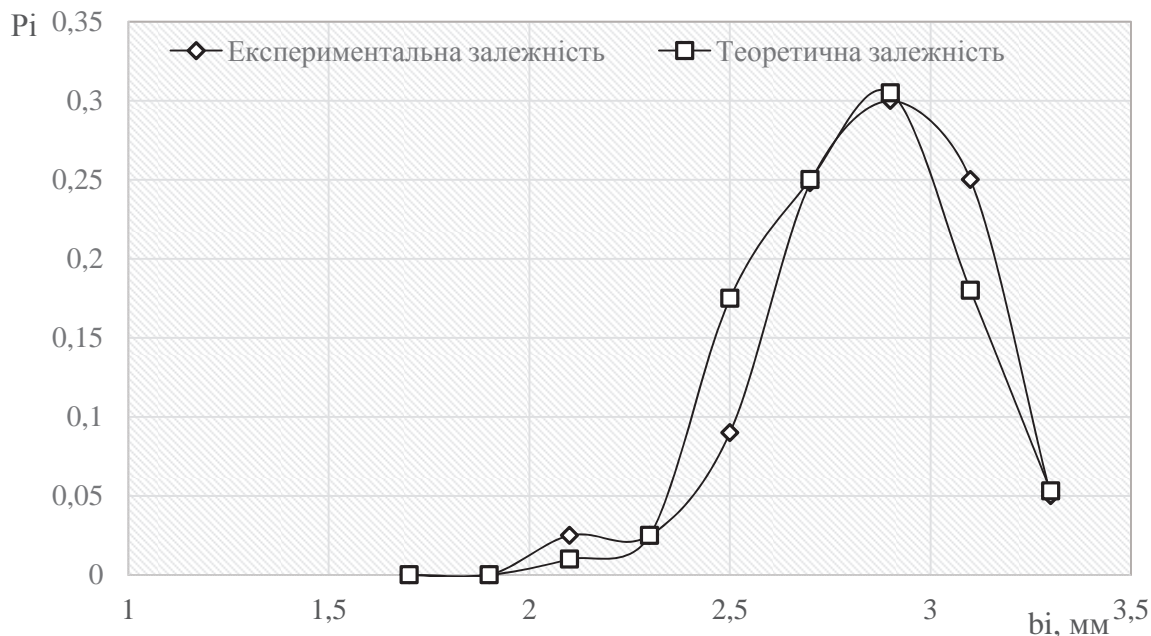


Рисунок 1 – Теоретична та експериментальна залежність розподілу зернового вороху за товщиною

Джерело: розроблено авторами

З графіка видно, що експериментальна та теоретична криві збігаються, що свідчить про відповідність даної залежності нормальному закону розподілу. Для перевірки цієї гіпотези щодо розподілу товщини зернівок у вихідному воросі застосовувався критерій Пірсона. Для визначення закону розподілу вихідного зернового вороху за його аеродинамічними властивостями необхідно обчислити такі характеристики.

$$M_v = \sum_{i=1}^n V_{icp} P_{Vi} , \quad (6)$$

де P_{Vi} – частка вороху, виділеного за кожної i -ї швидкості витання;
 V_{icp} – середня швидкість витання зернівок кожного i -го класу, м/с.

$$V_{icp} = \frac{V_{P(i+1)} + V_{Pi}}{2} , \quad (7)$$

де V_{Pi} і $V_{P(i+1)}$ – швидкості витання зернівок для даного та попереднього класу відповідно, м/с.

Середньоквадратичне відхилення швидкості витання зернівок визначається за такою формулою:

$$\sigma_v = \sqrt{\sum_{i=1}^n (V_{i\text{ср}} - M_v)^2 P_{v_i}} . \quad (8)$$

Теоретичну ймовірність виділення зернівок за відповідної швидкості витання можна розрахувати за такою формулою:

$$P_{v_i} = \Phi\left(\frac{V_{i+1} - M_v}{\sigma_v}\right) - \Phi\left(\frac{V_i - M_v}{\sigma_v}\right), \quad (9)$$

де $\Phi(x)$ – інтегральна нормальна функція розподілу, або функція Лапласа.

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt . \quad (10)$$

Розподіл вихідного вороху озимої пшениці за аеродинамічними властивостями підкоряється нормальному закону розподілу. Для перевірки гіпотези про відповідність розподілу зернівок вихідного вороху нормальному закону використовували критерій Пірсона. Експериментальні та теоретичні криві розподілу співпадають між собою (рис. 2).

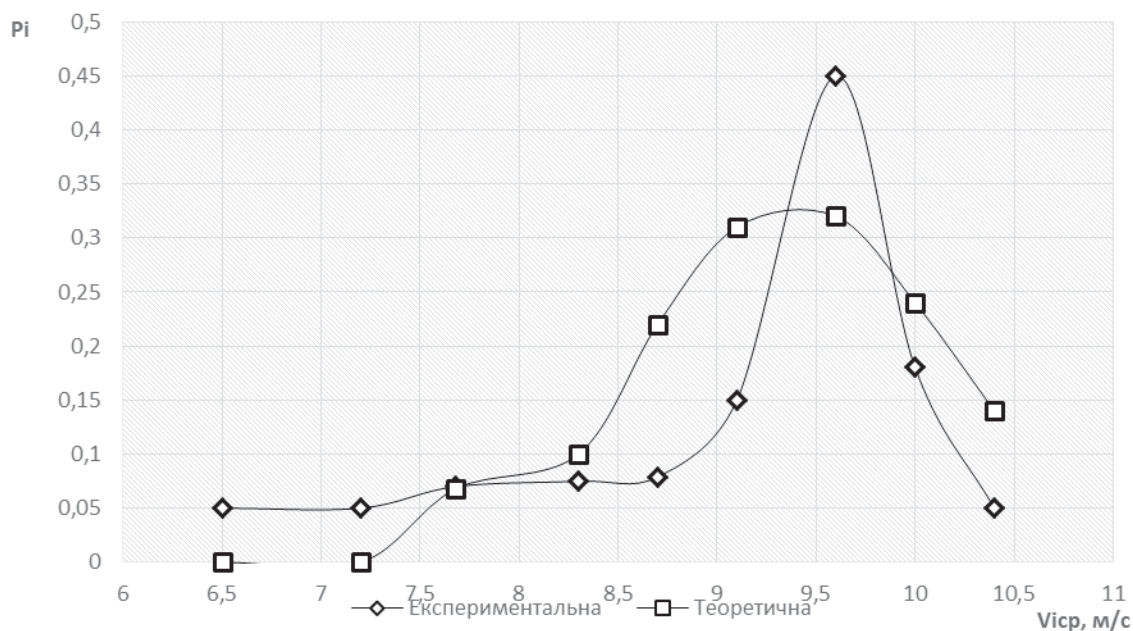


Рисунок 2 – Теоретична та експериментальна залежність розподілу зернового вороху за аеродинамічними властивостями

Джерело: розроблено авторами

Для отримання високоякісного насіння необхідно вже на самій ранній стадії післязбиральної обробки виділяти в кормову фракцію та відходи біологічно неповноцінні зернівки та забруднювачі. Це дозволить здійснити налаштування повітряно-решітних зерноочисних машин на режим фракціонування, а саме, підбір відповідних решіт і швидкості повітряного потоку в залежності від складу та якості вихідного вороху. Також необхідною умовою для отримання якісного насіння є підбір та встановлення додаткового обладнання в лінії очистки насіння для остаточної очистки з мінімальною кількістю транспортуючих органів.

Для підбору сортуючих решіт у повітряно-решітних зерноочисних машинах були проведені дослідження щодо розподілу вихідного вороху пшениці на решетах з різними діаметрами отворів з інтервалом 0,2 мм. В процесі досліджень проводили розрахунки з зміною розмірів отворів решіт $b_{pi} = 2,0 \dots 2,6$ мм та повнотою поділу на решетах $\epsilon_b = 0,6 \dots 0,9$ для кожного компонента вихідного вороху. Залежно від того, який розмір отворів буде встановлений для сортуючих решіт і яка буде повнота поділу зернового вороху, можна визначити з якою ймовірністю виділиться той чи інший компонент у основну або кормову фракцію (рис.3).

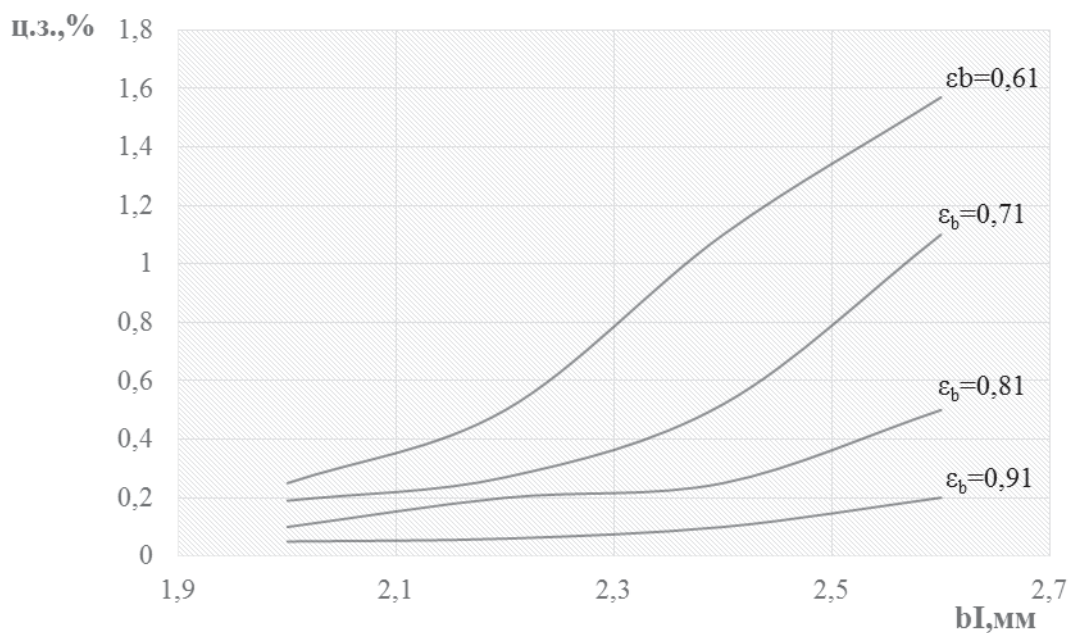


Рисунок 3 – Залежність впливу ширини отвору сортуючого решета (b_{pi}) на виділення частки цілого зерна (Ц.З.) в кормову фракцію з урахуванням повноти поділу на решетах (ϵ_b)

Джерело: розроблено авторами

Аналізуючи отримані графіки, видно, що зі збільшенням розміру отворів сортуючого решета та збільшенням повноти поділу спостерігається підвищення виходу цілого зерна з основної фракції. При повноті поділу $\epsilon_b = 0,6$ вихід повноцінного зерна збільшується з 0,24 до 1,94 % на решетах з розмірами отворів 2,0...2,6 мм. В основну (насіenneву) фракцію повинні потрапляти лише цілі зернівки з мінімальною кількістю домішок. Тому сортуюче решето необхідно підбирати таким чином, щоб через нього просипалися біологічно неповноцінні зернівки з низькою масою 1000 зерен і забруднювачі, але не допускати виходу повноцінного зерна в кормову фракцію. На рисунку 4 представлена графічна залежність впливу ширини отвору сортуючого решета (b_{pi}) на ймовірність виділення дробленого зерна (Д.З.) в кормову фракцію з урахуванням повноти поділу на решетах (ϵ_b).

Залежно від того, з яким розміром отворів буде встановлено сортуюче решето, та якою буде повнота поділу зернового вороху, можна визначити з якою ймовірністю виділятимуться дроблені зернівки в кормову фракцію. Виділення частки дроблених зернівок з основної фракції в кормову збільшується зі збільшенням отворів решіт з 2,0 до 2,6 мм та збільшенням повноти поділу з 0,6 до 0,9. Максимальний вихід дробленого зерна в кормову фракцію буде спостерігатися при встановленні сортуючих решіт з шириною отворів 2,6 мм, при повноті поділу 0,9, що складе 0,2 %.

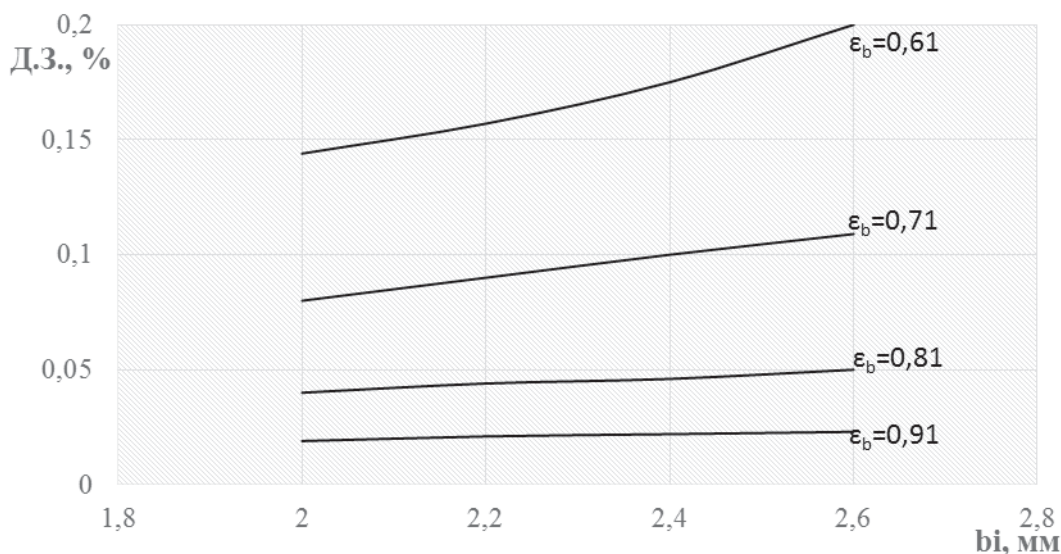


Рисунок 4 – Ймовірність виділення подрібненого зерна з основної фракції залежно від розміру отворів решіт та повноти розділення на решетах

Джерело: розроблено авторами.

В залежності від складу компонентів вихідного зернового вороху, сільгоспвиробники можуть варіювати розміри отворів решіт, збільшуючи їх для більш якісного виходу кінцевого продукту, але втрачаючи при цьому частку цілого зерна.

Ймовірність виділення забруднювачів збільшується зі збільшенням розмірів отворів сортуючих решіт та зі збільшенням повноти поділу зернового вороху. При повноті поділу, рівній $\epsilon_b=0,91$, виділення забруднювачів практично не змінюється зі збільшенням розмірів отворів сортуючих решіт і коливається в межах $Z=0,001$ %. Найбільша кількість забруднювачів ($Z=0,018$ %) може виділитися при повноті поділу, рівній $\epsilon_b=0,6$, та сортуючому решеті з розмірами отворів 2,6 мм (рис.5)

Виділення зерна в оболонці на досліджуваних решетах не здійснюється, оскільки зернівки мають більшу товщину. Виділення цього компонента може здійснюватися за аеродинамічними властивостями в другій аспірації повітряно-решітних зерноочисних машин або на наступному етапі підготовки насінневого матеріалу за допомогою машин остаточної очистки, що розділяють зерновий ворох за щільністю.

Аналізуючи отримані графіки (рис. 6), можна побачити, що з збільшенням розміру отворів решіт маса 1000 зерен пшениці збільшується. На решетах з розмірами отворів $b_p=2\dots2,2$ мм спостерігається найбільш низька маса 1000 зерен, що свідчить про необхідність виділення цього зерна в кормову фракцію. Тому для отримання насінневого матеріалу доцільно встановлювати сортуючі решета з розмірами отворів $b_p=2,4\dots2,6$ мм. Також на вихід кінцевого продукту впливає і повнота поділу вихідного вороху. Чим вища повнота поділу, тим вища маса 1000 зерен. При повноті поділу (ϵ_b) 0,6 і 0,7 та ширині отворів решіт (b_p) від 2,0 до 2,6 мм маса 1000 зерен змінюється від 39,9 до 40,44 г. У той час як при повноті поділу (ϵ_b) 0,81 і 0,91 маса 1000 зерен збільшується від 40,07 до 41,32 г

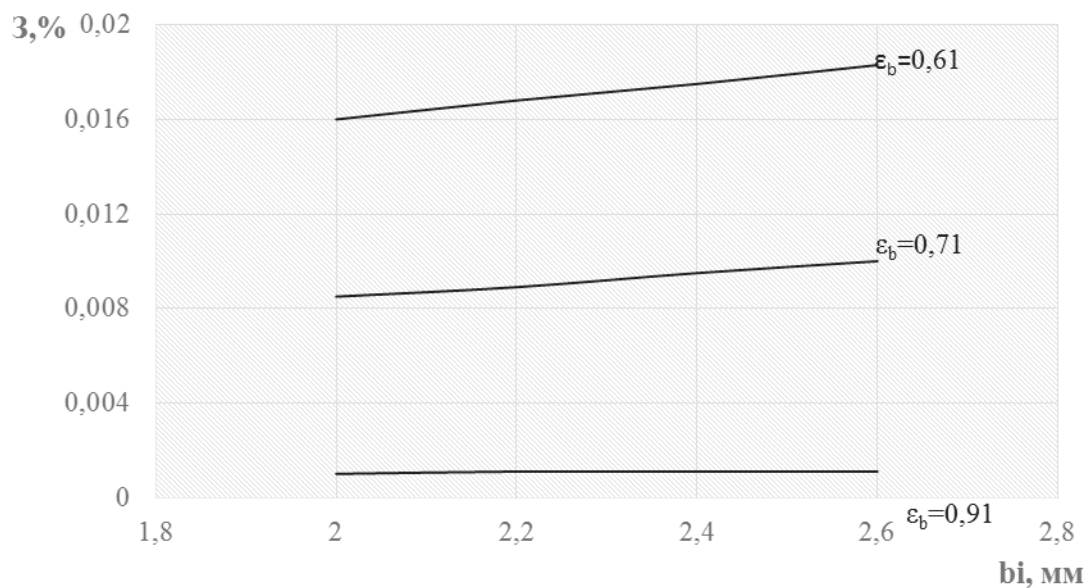


Рисунок 5 – Ймовірність виділення засмічувачів з основної фракції залежно від розміру отворів решіт (b_{pi}) та повноти розділення на решетах (ϵ_b).

Джерело: розроблено авторами

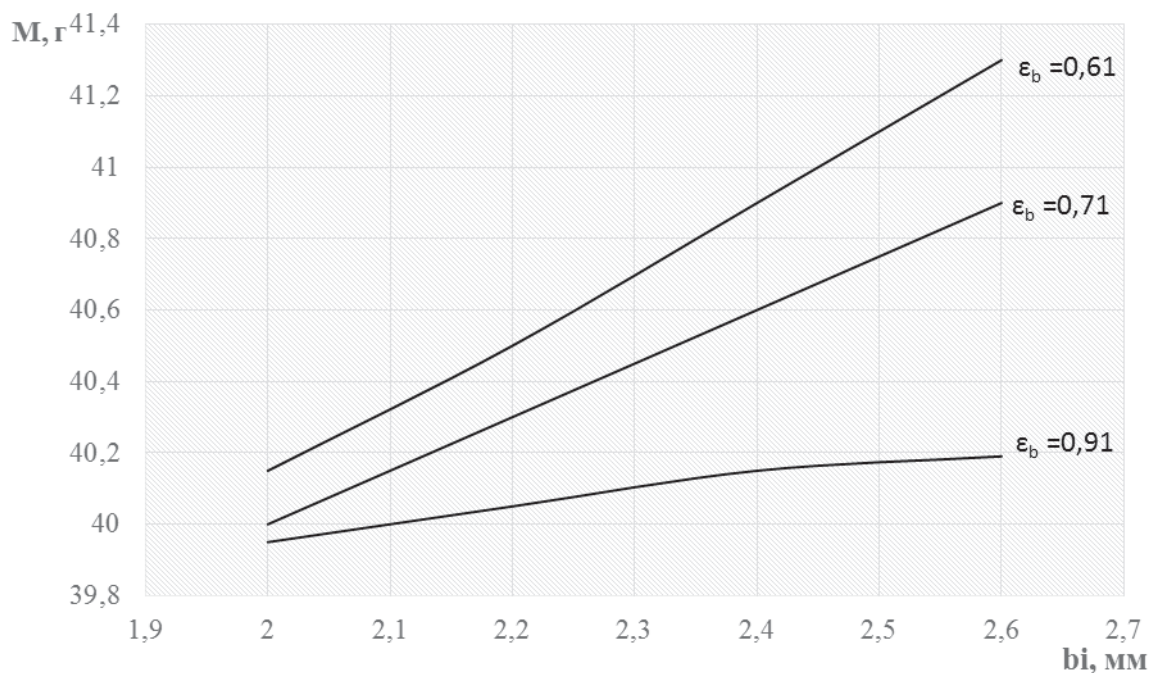


Рисунок 6 – Зміна маси 1000 зерен (M_{1000}) від ширини отвору сортуючого решета (b_{pi}) з урахуванням повноти поділу на решетах (ϵ_b)

Джерело: розроблено авторами

На основі отриманих даних про ймовірність долі виходу компонентів зернового вороху в кормову фракцію в залежності від розміру отворів сортуючих решіт і повноти поділу (рис. 3–5), а також впливу цих параметрів на масу тисячі зерен (рис. 6), можна зробити висновок, що для отримання високоякісного насінневого матеріалу необхідно встановлювати сортуючі решета з розмірами отворів $b_p = 2,4 \dots 2,6$ мм і повнотою поділу $\epsilon_b = 0,81$. Оскільки при більшій повноті поділу в основну (насінневу) фракцію будуть потрапляти біологічно неповноцінні, дроблені зернівки і забруднювачі, а при

меншій — спостерігатиметься високий відсоток виходу повноцінного зерна з масою 1000 зерен більше 40 г в кормову фракцію. Виділення зерна в оболонці, а також недовіділившихся компонентів на решетах можливо здійснити у другій фракції повітряно-решітних зерноочисних машин або на машинах остаточної очистки за щільністю.

Висновки.

1. Встановлено, що розподіл зернового вороху пшениці за аеродинамічними характеристиками та товщиною зерен підпорядковується нормальному закону розподілу, що підтверджено експериментально та теоретично.

2. Ефективність очищення залежить від швидкості повітряного потоку, розмірів отворів сортуючих решіт та повноти поділу. Оптимальними параметрами для отримання якісного насіння є отвори 2,4–2,6 мм при повноті поділу $\epsilon_b = 0,81$.

3. Запропоновано методику підбору конструктивно-режимних параметрів, яка дозволяє мінімізувати втрати повноцінного зерна та забезпечити високий рівень видалення домішок.

4. Використанням математичного моделювання в очищенні зерна дає змогу точно прогнозувати поведінку фракцій у повітряному потоці та підвищити ефективність роботи зерноочисних машин.

Список літератури

1. Кальченко А. І. Теорія і практика очищення зерна. Київ : Урожай, 2012. 284 с.
2. Марченко О. М., Савченко О. Ю. Повітряні сепараційні системи: розрахунок і оптимізація. Харків : ХНАУ, 2020. 198 с.
3. Барановський В. М. Основи аеродинамічного поділу зернових сумішей. Львів : ЛНАУ, 2018. 160 с.
4. Дяченко С. М. Дослідження динаміки зернового вороху в аспіраційних каналах. *Вісник аграрної науки*. 2019. № 6. С. 37–41.
5. Гетьман В. В., Козачок О. О. Механізовані процеси очищення зернових культур. Кропивницький : ЦНТЕІ, 2021. 176 с.
6. Kuznetsov A. P., Gritsenko A. V. *Aerodynamics of granular agricultural materials*. Springer, 2017.
7. Коваль С. Я. Дослідження ефективності повітряного очищення зерна. *Наукові праці ТДАТУ*. 2020. № 4(100). С. 45–50.
8. Кузьменко В. М. Сільськогосподарські машини. Ч. 2 : Зерноочисна техніка. Київ : Ліра-К, 2016. 312 с.
9. Татарчук В. І. Повітряно-решітні зерноочисні машини: розрахунок та експлуатація. Полтава : ПДАА, 2022. 138 с.
10. Zhao Y., Zhang Y., Zhang W. Experimental and CFD study on separation of wheat impurities by airflow. *Journal of Food Process Engineering*. 2021. Vol. 44, No. 7. e13750.
11. He X., Zhang B., Liu Q. Influence of grain size and airflow velocity on cleaning performance in air-screen seed separators. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*. 2019. Vol. 21, No. 3. P. 46–54.
12. Vaiciukevičius E., Jotautienė E., Kemzūraitė A., Tamošiūnas A., Čiplienė A., Petrauskienė R. Determination of optimal technological parameters for wheat grain sorting in airflow. *Processes*. 2023. Vol. 11, No. 10. P. 3441. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr11103441>

References

1. Kalchenko, A. I. (2012). *Teoriia i praktyka ochyshchennia zerna* [Theory and practice of grain cleaning]. Kyiv: Urozhai [in Ukrainian].
2. Marchenko, O. M., & Savchenko, O. Yu. (2020). *Povitriani separatsiini systemy: rozrakhunok i optymizatsiia* [Air separation systems: calculation and optimization]. Kharkiv: KhNAU [in Ukrainian].
3. Baranovskyi, V. M. (2018). *Osnovy aerodynamichnoho podilu zernovykh sumishei* [Fundamentals of aerodynamic separation of grain mixtures]. Lviv: LNAU [in Ukrainian].

4. Diachenko, S. M. (2019). Doslidzhennia dynamiky zernovoho vorokhu v aspiratsiinykh kanalakh [Study of grain heap dynamics in aspiration channels]. *Visnyk ahrarnoi nauky*, 6, 37–41 [in Ukrainian].
5. Hetman, V. V., & Kozachok, O. O. (2021). *Mekhanizovani protsesy ochyshchennia zernovykh kultur* [Mechanized processes of grain crop cleaning]. Kropyvnytskyi: TsNTEI [in Ukrainian].
6. Kuznetsov, A. P., & Gritsenko, A. V. (2017). *Aerodynamics of granular agricultural materials*. Springer.
7. Koval, S. Ya. (2020). Doslidzhennia efektyvnosti povitrianoho ochyshchennia zerna [Study of grain air cleaning efficiency]. *Naukovi pratsi TDATU*, 4(100), 45–50 [in Ukrainian].
8. Kuzmenko, V. M. (2016). *Silskohospodarski mashyny. Part 2: Zernoochysna tekhnika* [Agricultural machines. Part 2: Grain cleaning equipment]. Kyiv: Lira-K [in Ukrainian].
9. Tatarchuk, V. I. (2022). *Povitriano-reshitni zernoochysni mashyny: rozrakhunok ta ekspluatatsiia* [Air-sieve grain cleaning machines: calculation and operation]. Poltava: PDAA [in Ukrainian].
10. Zhao, Y., Zhang, Y., & Zhang, W. (2021). Experimental and CFD study on separation of wheat impurities by airflow. *Journal of Food Process Engineering*, 44(7), e13750.
11. He, X., Zhang, B., & Liu, Q. (2019). Influence of grain size and airflow velocity on cleaning performance in air-screen seed separators. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 21(3), 46–54.
12. Vaiciukevičius, E., Jotautienė, E., Kemzūraitė, A., Tamošiūnas, A., Čiplienė, A., & Petrauskienė, R. (2023). Determination of optimal technological parameters for wheat grain sorting in airflow. *Processes*, 11(10), 3441. <https://doi.org/10.3390/pr11103441>

Tesliuk Hennadii, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Olena Zolotovska**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksandr Kobets**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Andrii Kovcun**, PhD student
Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Modeling of Aerodynamic Processes in the Cleaning of Grain Mass in an Airflow

The purpose of this article is to substantiate and model the aerodynamic processes that occur during the cleaning of grain mass in airflow-based separation systems. The research is aimed at identifying optimal technological and structural parameters of air-sieve machines, determining the influence of airflow velocity and sieve configuration on the effectiveness of separation, and developing mathematical models that can describe the probability of particle allocation in the cleaning process. Special attention is paid to the statistical interpretation of experimental data in order to establish the most appropriate laws of particle distribution for practical application in post-harvest grain processing.

The study combines theoretical modeling with experimental investigations. Laboratory tests were conducted to evaluate the effect of airflow velocity on the movement of wheat grain fractions and to assess their distribution by thickness using variable sieve openings. The obtained data confirmed that both aerodynamic and geometric characteristics of the particles follow the normal distribution law, verified through Pearson's chi-squared test. Based on these findings, mathematical models were developed to describe the probability of grain particle separation into fractions depending on their floating velocity and physical parameters. The experimental results demonstrated that sieve openings of 2.4–2.6 mm provide the highest cleaning quality, reaching a separation completeness of $\epsilon_b = 0.81$. Under these conditions, the loss of valuable full-sized kernels was minimized while ensuring the removal of broken grains, weed seeds, and other impurities. The research also emphasized the importance of precise airflow adjustment to prevent excessive carryover of high-quality grain into the waste fraction.

The conclusions of this work confirm that the efficiency of grain cleaning can be significantly increased through the correct selection of airflow velocity and sieve dimensions in pneumatic separation systems. The developed mathematical models and recommendations provide a solid basis for improving the design of air-sieve machines, reducing energy losses, and enhancing the quality of food and seed grain. The obtained results can be applied in modern grain processing technologies, offering practical guidance for optimizing equipment operation and increasing the competitiveness of agricultural production.

grain cleaning, pneumatic separation, airflow velocity, aerodynamic properties, grain thickness, sorting sieve, air-sieve cleaning machine, normal distribution

Одержано (Received) 10.09.2025

Прорецензовано (Reviewed) 17.10.2025

Прийнято до друку (Approved) 23.12.2025