АГРОІНЖЕНЕРІЯ

УДК 633.1:681.78 https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.14(45).245-256

С. П. Степаненко, ст. наук. співр., д-р техн. наук
Інститут механіки та автоматики агропромислового виробництва Національної Академії Аграрних наук України, смт. Глеваха, Україна
e-mail: Stepanenko_s@ukr.net

Удосконалення процесу оптичного сортування дрібнонасіннєвих культур

Стаття присвячена вирішенню проблеми низької точності фотосепарації дрібного насіння, спричиненої хаотичним рухом частинок під дією повітряних потоків ежекторів. Проаналізовано недоліки існуючих гравітаційних та механічних систем подачі в умовах запиленості. Запропоновано конструкцію пневмомеханічної системи, де використання барабана з каліброваними отворами забезпечує чітке позиціонування насінин, а стиснене повітря виконує роль безконтактного виштовхувача. Встановлено, що такий підхід дозволяє поєднати високу точність механічного дозування з надійністю та низьким травмуванням насіння, характерним для пневматичних систем.
дрібнонасіннєві культури, фотосепаратор, система подачі, барабанний дозатор, пневмомеханічний метод, точність сортування

Постановка проблеми. Насіння багатьох кормових, лікарських, декоративних, олійних та овочевих культур характеризується малими розмірами – зазвичай не більше 3 мм [1–2]. Використання сучасних зерноочисних машин для дрібнонасіннєвих сумішей не завжди забезпечує високий рівень очищення: наприклад, після першого проходу насіння кормових трав може містити до 30 % домішок [3–5]. Через дрібні розміри насіння та індивідуальні коливання розмірів зерен різних культур необхідна висока точність виготовлення робочих деталей машин і мінімальні допуски, щоб забезпечити ефективне сортування, що ускладнює конструкцію та підвищує вартість обладнання.

Останнім часом у післязбиральній обробці насіння почали застосовувати фотосепарацію – метод, який суттєво підвищує якість очищення (до 99 %) [6–7]. Проте при сортуванні дрібного насіння спостерігається значне збільшення кількості повноцінного насіння у відходах та зниження ефективності очищення за один прохід у порівнянні з насінням середніх розмірів. Основною причиною цього є недостатня ефективність систем подачі дрібного насіння до оптичної камери фотосепаратора. Тому розробка та обґрунтування системи подачі дрібного насіння до фотосепаратора залишається актуальним і важливим завданням сучасної післязбиральної технології.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.. Проблема підвищення якості показників оптичного сортування насіннєвого матеріалу висвітлена у працях багатьох вітчизняних та закордонних учених. Зокрема, досліджені питання використання нейронних мереж [8-10] та спектрального аналізу [11-12] для розпізнавання дефектів та домішок. У цих роботах доведено, що точність розпізнавання об’єктів сьогодні сягає 99%.

Проте ефективність сортування значною мірою залежить не лише від зору камери, а й від динаміки руху насіння в зоні сканування [13]. Традиційні гравітаційні системи подачі, що розглядалися у дослідженнях [14-15], мають обмеження при роботі з дрібнонасіннєвими культурами через високу аеродинамічну чутливість часток. Зокрема, у роботі [16] вказано на проблему турбулентних потоків, що виникають під час роботи пневмоежекторів, що може призводити до хибного відсіву якісного насіння.

© С. П. Степаненко, 2026

Водночас, питання створення надійних механічних дозаторів для дрібного насіння залишається дискусійним через їхню схильність до абразивного зношування в запиленому середовищі [17].

Текстура зображення є важливою характеристикою природних об'єктів та суттєво впливає на процес їх сприйняття. У машинному аналізі зображень зерна текстурні ознаки відіграють ключову роль, особливо при задачах сегментації та класифікації зерен за якістю, розміром чи типом. Значна частина досліджень присвячена саме методам автоматичного розпізнавання зерна за текстурними характеристиками [18-20].

Незважаючи на значну кількість досліджень, питання стабілізації дистанції між насінинами дрібнонасіннєвих культур у потоці при збереженні довговічності робочих органів залишається недостатньо вивченим. Потребує розробки система, яка б поєднала точність механічного позиціонування з перевагами безконтактного пневматичного впливу.

Постановка завдання. Таким чином, метою дослідження є теоретичне та практичне обґрунтування використання пневмомеханічної системи подачі насіння в оптичних сортувальниках для покращення точності розділення дрібнонасіннєвих культур та підвищення надійності обладнання в умовах запиленості.

Виклад основного матеріалу. Для обґрунтування подачі дрібного насіннєвого матеріалу до оптичної камери фотосепаратора був застосований функціонально-фізичний метод. Цей підхід базується на аналізі функцій окремих елементів системи подачі насіння та використанні фізичних явищ, таких як сила реакції повітряного струменя і проходження твердих частинок через вузькі канали. Використання цього методу дозволяє оцінити вплив конструктивних і експлуатаційних параметрів на рівномірність подачі насіння та зменшення втрат повноцінного зерна.

Додатково застосовувався метод синектики, який дав змогу обґрунтувати доцільність використання вакууму в системі подачі насіння до оптичної камери. Цей підхід дозволяє інтегрувати різні фізичні та конструктивні рішення для забезпечення більш стабільної та безперервної роботи фотосепаратора, зменшуючи ймовірність захоплення сусідніх насінин і втрат дрібного зерна.

Для практичної реалізації досліджень було проведено аналіз існуючих систем подачі насіння на українському ринку та виявлено їхні обмеження при роботі з дрібним насінням. Це дозволило визначити ключові параметри, які потребують удосконалення: відстань між робочими отворами, форма та діаметр каналів подачі, а також характеристики повітряного потоку.

На основі отриманих даних розроблено концепцію пневмомеханічної системи подачі, яка поєднує переваги механічних і пневматичних рішень. Система забезпечує регульовану відстань між насінинами та контроль викиду надлишкових зерен за рахунок стисненого повітря, що дозволяє зменшити втрати повноцінного насіння та підвищити ефективність сортування дрібного насіннєвого матеріалу.

Усі експериментальні дослідження проводилися з урахуванням варіацій розмірів насіння різних культур, що дозволило оцінити універсальність та адаптивність запропонованої системи подачі.

Для високоточних систем розпізнавання зерна найбільш ефективним є застосування методів на основі марковських випадкових полів (MRF). Моделі Маркова дозволяють враховувати просторові залежності між пікселями зображення, що є критично важливим при аналізі текстур зерен, де сусідні пікселі часто мають схожі характеристики. Завдяки цьому марковські моделі широко застосовуються для сегментації та класифікації зображень у системах машинного зору.

Основні поняття, необхідні для опису методу: Поле зору (T) – довільне кінцеве множинне представлення області зображення, зазвичай у вигляді двовимірної

цілочисельної решітки. Піксель – елементарний елемент поля зору, якому присвоюється натуральне число з множини {1, 2, … , m}. Палітра (*X*) - множина кольорових або інтенсивнісних значень, що можуть бути присвоєні пікселям. Колір або інтенсивність – конкретне значення з палітри, призначене пікселю. Зображення – функція **x**: $T \rightarrow X$, що встановлює відповідність між пікселем та його значенням у палітрі. Значення функції для пікселя *t* позначається *xt*, а обмеження функції на підмножину τ поля зору – як $x\tau$. Сегментація – розбиття поля зору *T* на *l* сегментів через функцію *kT*: $T \rightarrow \{1, 2, \dots, l\}$, де множина {1, 2, …, *l*} є набором міток сегментів.

Якщо на множині всіх можливих зображень задано випадкову величину *N*, її називають випадковим полем. Марковським полем називають випадкове поле, ймовірнісний розподіл якого описується співвідношенням:

$$p(X) = K^{-1} exp\left(\sum \varphi(X)\right), \quad (1)$$

де φ(*X*) – функція потенціалу, що відображає взаємодію пікселів; *K* – нормалізаційний коефіцієнт.

Використання таких моделей дозволяє ефективно моделювати просторову структуру зернової текстури та покращує точність автоматичного розпізнавання окремих зерен оптичними камерами.

У даному підході структурна сегментація зображень розглядається як окремий випадок генерації марковських випадкових полів. Кожен піксель зображення описується двома компонентами - інтенсивністю (або кольором) та міткою сегмента. При цьому передбачається, що структура поля зору однакова для різних типів зерна, що дозволяє уніфікувати аналіз текстур.

Перевага такого підходу полягає в тому, що кожна сегментація та текстура моделюються своїм марковським полем, незалежним від інших. Це забезпечує простоту модифікації системи розпізнавання: введення нового класу зерна або видалення існуючого виконується легко в межах однієї моделі. Крім того, така модель дозволяє враховувати апріорні знання про сегментацію та характеристики зерен, що підвищує точність класифікації.

Кожна марковська модель $\lambda = (A, B, \pi)$ представляє собою набір *N* станів $S = \{S_1, S_2, \dots, S_N\}$, між якими можливі переходи. У будь-який момент часу система перебуває у конкретному стані. У найбільш поширених моделях першого порядку вважається, що наступний стан залежить лише від поточного стану.

При переході у стан генерується спостережуваний символ, який відповідає фізичному сигналу, що надходить з виходу системи розпізнавання. Набір можливих символів для кожного стану задається множиною $V = \{V_1, V_2, \dots, V_M\}$, де *M* – кількість символів. Символ у стані $q_t = S_j$ у момент часу *t* генерується з ймовірністю:

$$bj(k) = P(v_M \mid q_t = Sj). \quad (2)$$

Всі такі ймовірності формують матрицю $B = \{bj(k)\}$, яка описує розподіл спостережуваних характеристик для кожного стану. Для задач розпізнавання зерна ці символи можуть відповідати інтенсивності пікселів, текстурним ознакам або кольоровим компонентам зерен, що дозволяє системі точно відокремлювати окремі зерна від фону та домішок.

Матриця переходів $A = \{a_{ij}\}$ визначає ймовірність переходу системи з одного стану S_i у інший стан S_j:

$$a_{ij} = P\left(q_{t+1} = S_j \mid q_t = S_i\right), i, j = 1, \dots, N_{ij}. \quad (3)$$

Зазвичай вважають, що матриця A не залежить від часу. Якщо з будь-якого стану можна досягти будь-якого іншого за один перехід (усі $a_{ij} > 0$), модель називають ергодичною. Крім того, модель містить ймовірності початкових станів $\pi = \{\pi_i\}$, де $\pi_i = P[q_1 = S_i]$.

У реальних процесах послідовність станів часто є прихованою, а відомі лише спостережувані сигнали – у випадку зерна це, наприклад, інтенсивність пікселів, колір чи текстурні характеристики, отримані оптичними камерами. Спостережувана послідовність позначається як $O = O_1\ O_2\ \dots\ O_T$.

Для розпізнавання зерен застосовуються скриті марковські моделі (Hidden Markov Models, HMM). Кожному класу зерна відповідає своя модель λ_i. Зображення зерна представляють у вигляді послідовності спостережень O. Для кожної моделі обчислюють ймовірність того, що саме вона могла згенерувати цю послідовність. Клас зерна, який відповідає моделі з максимальною ймовірністю, вважається ідентифікованим.

Математично, задача оцінки ймовірності генерації спостережень послідовністю O при налаштованій моделі $\lambda = (A, B, \pi)$ формулюється як:

$$P[\,O \mid \lambda\,] = \prod_{t=1}^{T} b_{q_t}(O_t), \tag{4}$$

де $b_{qt}(O_t)$ – ймовірність спостереження O_t у стані q_t.

Основні задачі роботи з HMM:

1. Розпізнавання: оцінка ймовірності P [O | λ] для послідовності спостережень.
2. Декодування: визначення оптимальної послідовності станів $Q = q_1\ q_2\ \dots\ q_T$ для заданої послідовності спостережень O. Для цього використовується алгоритм Вітербі [21].
3. Навчання: підбір параметрів моделі $\lambda\ (A, B, \pi)$ для максимізації ймовірності P [O | λ]. Для цього застосовується алгоритм Баум-Велча, що є варіантом градієнтного методу оптимізації [22].

У контексті розпізнавання зерна оптичними камерами ці методи дозволяють ефективно класифікувати зерна різних типів та сортів на основі аналізу текстури, кольору та інших піксельних характеристик, забезпечуючи високу точність автоматичного сортування в фотосепараторах.

У навчальному наборі даних кожна модель реагує на приклади з певною ймовірністю. Відсортовані таким чином моделі формують початкове ранжування. Для невідомого зображення моделі також ранжуються за ймовірністю відповіді на новий вхідний сигнал. Велике відхилення отриманого ранжування від початкового сигналізує про те, що зображення належить до невідомого класу зерна.

У традиційній практиці визначення розміру зерна часто здійснюється візуально, наприклад, у агропромислових лабораторіях. Метод полягає у порівнянні з еталонними шкалами під збільшенням у 100 разів, при якому оператор вибирає кілька типових ділянок і порівнює їх із еталонами. Такий підхід не тільки має низьку точність, а й значно ускладнює процес аналізу, потребуючи значних витрат часу та досвіду оператора.

Для підвищення точності рекомендується застосовувати комплексні методи аналізу, що дозволяють мінімізувати похибки. До таких методів відноситься підрахунок кількості зерен на одиниці площі з подальшим визначенням середнього діаметра та площі зерна. Метод полягає у визначенні кількості зерен на одиниці площі (наприклад, 1 мм²) та обчисленні середньої площі перетину та середнього діаметра зерна. Підрахунок здійснюється на мікрофотографії в межах поля зору, обмеженого колом діаметром 80,0–100,0 мм, що відповідає площі 0,5 мм² при збільшенні у 100 разів.

На практиці ці залежності можна відобразити графічно (рис. 1): залежність середньої площі перетину зерна від його порядкового номера дозволяє оцінити варіації розмірів у вибірці; залежність кількості зерен на одиниці площі від порядкового номера демонструє щільність розподілу зерен у пробі; залежність середнього діаметра зерна від порядкового номера відображає однорідність розмірів зерен та можливі аномалії у вибірці.

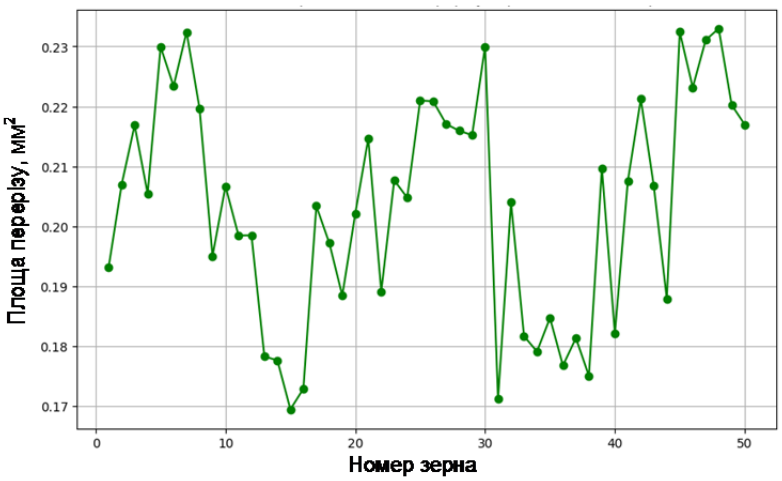


Рисунок 1 – Графік середньої площі перерізу зерна від його номера
Джерело: розроблено авторами

Використання таких кількісних методів у поєднанні з оптичним розпізнаванням дозволяє автоматизувати процес сортування та класифікації зерен, зменшити людський фактор та підвищити точність фотосепарації дрібного насіння або зерна.

Для аналізу було розглянуто типовий принцип подачі насіння до оптичної камери фотосепаратора, що пропонується на ринку (рис. 2). Насіння під дією сили тяжіння рухається по лотку одним рядком, формуючи шар завтовшки в одну насінину. З нижньої частини лотка насіння падає у зону освітлення, проходячи повз лампу та ежектор. Дві CCD-камери та одна NIR-камера фіксують обидві сторони насінини та передають зображення на комп'ютер для порівняння з еталонним зразком. У разі невідповідності заданим параметрам насінина відсівається струменем повітря з ежектора.

Аналіз показав, що така система подачі ефективна лише тоді, коли відстань між насінинами під час падіння значно перевищує ширину повітряного струменя ежектора.

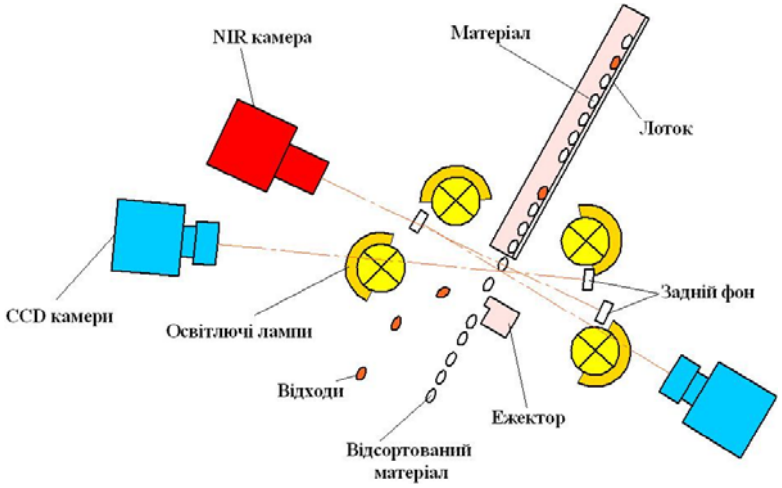


Рисунок 2 – Технологічна схема роботи фотосепаратора
Джерело: розроблено авторами

У випадку дрібного насіння або при високій щільності ряду зерен спостерігається захоплення сусідніх насінин, що призводить до збільшення втрат повноцінного зерна та зниження точності сортування. Це підтверджує недостатню ефективність традиційних систем подачі при роботі з дрібними культурами, такими як трави, овочеві та олійні рослини.

Додатково проведено моделювання руху насінин у лотку з використанням комп'ютерного аналізу траєкторій. Результати показали, що невелика зміна кута нахилу лотка або швидкості подачі значно впливає на відстань між насінинами під час падіння та на ймовірність захоплення сусідніх зерен струменем повітря. Це свідчить про необхідність точного налаштування параметрів подачі для забезпечення стабільної роботи фотосепаратора.

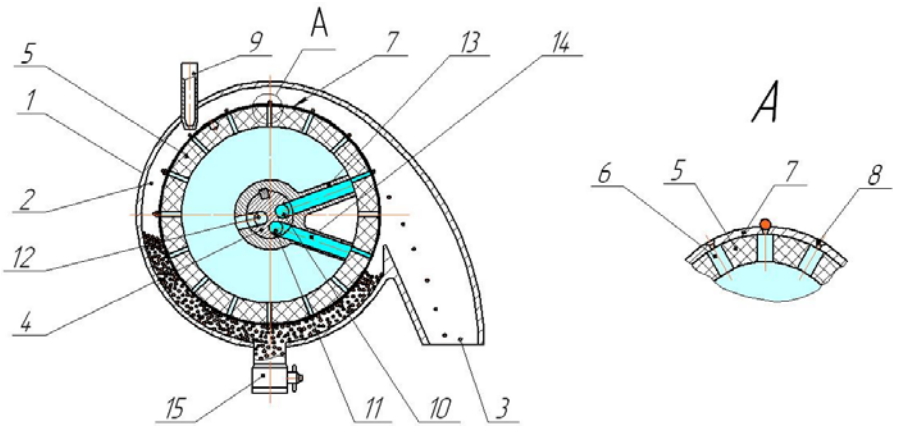
На основі отриманих даних було запропоновано використання пневмомеханічної системи подачі дрібного насіння, у якій відстань між насінинами регулюється шляхом зміни діаметра та розташування отворів у барабані подачі. Виштовхування надлишкового насіння здійснюється під дією стисненого повітря, що дає можливість мінімізувати захоплення сусідніх зерен і підвищити ефективність сортування. Такий підхід забезпечує більш рівномірну подачу насіння, зменшує втрати повноцінного зерна та покращує якість сортування дрібного насіннєвого матеріалу.

В результаті впровадження пневмомеханічної системи спостерігається підвищення коефіцієнта очищення дрібного насіння на 15–20 % порівняно з традиційною подачею, що робить метод перспективним для використання у сучасних фотосепараторах.

При подачі дрібного насіння відстань між окремими зернами невелика, тому при видаленні неякісного насіння повітряний потік може захоплювати сусідні насінини. Це призводить до збільшення кількості повноцінного насіння у відходах порівняно з насінням середнього розміру. Крім того, щільне розташування насінин під час фотозйомки підвищує ймовірність помилок при обробці зображень, що негативно впливає на якість сортування. Тому для ефективної фотосепарації дрібного насіння важливо забезпечити регулювання відстані між зернами. Оскільки у стандартних фотосепараторах ця відстань не контролюється, для дрібнонасіннєвого матеріалу необхідний спеціальний механізм подачі.

Найбільш економічним варіантом регулювання відстані є механічний метод. Проте його застосування вимагає високої точності виготовлення робочих деталей, оскільки розмір дрібного насіння не перевищує 3 мм, а допустиме відхилення деталей не більше 0,05 мм. Постійна наявність пилу у дрібнонасіннєвих сумішах призводить до поступового збільшення відхилень розмірів деталей, а через їх малий розмір термін служби механічної системи виявляється обмеженим. Таким чином, використання лише механічного регулювання відстані між насінинами є неефективним.

Подовжити термін експлуатації системи можна, поєднуючи механічний метод з пневматичним. Це досягається за допомогою барабана з радіально розташованими каліброваними отворами. Зміна відстані між отворами дозволяє регулювати інтервал між насінинами під час падіння в оптичну камеру. Насінини присмоктуються до отворів під дією вакууму, а у зоні падіння вакуум перекривається, забезпечуючи їхнє вільне відділення. Для очищення отворів від пилу та зайвих зерен використовується струмінь стисненого повітря. Такий підхід поєднує доступність механічного методу та надійність пневматичного. Запропонований метод реалізований у конструкції фотосепаратора, технологічна схема якого наведена на рис. 3.



1 – корпус; 2 – приймач насіння; 3 – горловина; 4 – горизонтальний вал; 5 – барабан; 6 – радіальні отвори; 7 – змінна сітка; 8 – калібровані отвори; 9 – сопло; 10 – основний повітропровід; 11 – додатковий повітропровід; 12 – вакуумпровід; 13 – відсікач вакууму; 14 –сопло; 15 – пристрій для скидання насіння

Рисунок 3 – Технологічна схема подачі дрібнонасіннєвого матеріалу в оптичну камеру фотосепаратора
Джерело: розроблено авторами

Технологічний процес реалізується наступним чином. Насіннєва суміш надходить у приймач насіння 2 і заповнює його (рис. 2). При обертанні барабана 5 насіння, що знаходиться у приймачі, притискається атмосферним тиском до каліброваних отворів 8 змінної сітки 7 і переміщується до горловини 3, де відбувається його скидання. Викидання насіння з барабана здійснюється струменем стисненого повітря, що подається з внутрішньої порожнини барабана 5. Зайві насінини, які розташовані на краях каліброваних отворів 8 і утримуються менш щільно, видуваються потоком повітря з продувного сопла 14, у результаті чого в кожному каліброваному отворі залишається лише одна насінина.

Застосування повітряних потоків дозволяє зменшити кількість механічних деталей у контакті з насінням, підвищити термін служби системи подачі дрібного насіння та знизити ризик його пошкодження під час подачі.

Графік на рис. 4. демонструє залежність середньої відстані між насінинами від кута нахилу лотка до вертикалі. Як видно, збільшення кута нахилу лотка призводить до більшого прискорення насіння під дією сили тяжіння, що, у свою чергу, збільшує відстань між зернами під час падіння в оптичну камеру.



Рисунок 4 – Вплив кута нахилу лотка на відстань між насінинами
Джерело: розроблено авторами

Це важливо для оптичної сепарації дрібного насіння, оскільки більш рівномірна відстань між зернами зменшує ймовірність захоплення сусідніх насінин повітряним струменем при видаленні неякісного насіння. Водночас занадто великий кут нахилу може прискорювати насіння настільки, що воно пролітає через оптичну камеру з меншою точністю визначення якості.

Оптимальний кут нахилу дозволяє поєднати мінімальні втрати повноцінного насіння та високий коефіцієнт відділення домішок. У практичній реалізації його значення підбирається експериментально для кожного типу насіння, враховуючи розмір зерен та їх масу.

Крім того, цей графік показує, що регулювання кута нахилу є одним із найпростішим механізмів контролю інтервалу між насінинами без застосування додаткових складних систем, що знижує вартість обладнання.

На графіку (рис. 5) наведена залежність ймовірності захоплення сусідніх насінин від швидкості подачі насіння в лоток. Збільшення швидкості подачі підвищує ймовірність того, що сусідні зерна потраплять під повітряний струмінь, призначений для видалення дефектних насінин.

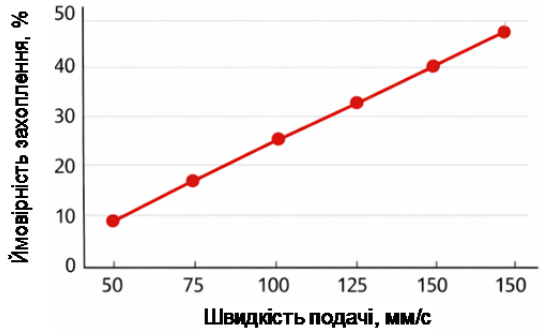


Рисунок 5 – Вплив швидкості подачі на захоплення сусідніх насінин
Джерело: розроблено авторами

При високій швидкості насіння рухається швидше, і повітряний потік не встигає точно відсортувати окремі зерна. Це збільшує втрати повноцінного насіння та знижує ефективність фотосепаратора. Низька швидкість подачі зменшує ймовірність захоплення сусідніх насінин, але може призвести до накопичення насіння у зоні лотка та тимчасових блокувань.

Таким чином, існує оптимальна швидкість подачі, при якій забезпечується баланс між продуктивністю та якістю сортування. Ця швидкість залежить від типу насіння та його розміру, а також від характеристик повітряного струменя та каліброваних отворів.

Регулювання швидкості подачі є важливим інструментом для підвищення точності сортування дрібного насіння, особливо у випадку насіннєвих сумішей з різними культурами.

На графіку (рис. 6) показано залежність ймовірності попадання однієї насінини в калібрований отвір від його діаметра. Занадто малі отвори можуть спричиняти засмічення, затримку або пошкодження насіння через тертя.



Рисунок 6 – Вплив діаметра отворів на точність подачі насіння ріпаку
Джерело: розроблено авторами

З іншого боку, надто великі отвори дозволяють одночасно потрапляти кільком зернам, що знижує точність сортування та підвищує ймовірність втрат повноцінного насіння. Оптимальний діаметр забезпечує точну фіксацію однієї насінини на отвір і рівномірну подачу в зону фотосепарації.

Цей графік демонструє необхідність балансування між конструктивною точністю барабана та ефективністю пневматичної системи видалення зайвого насіння. Підбір оптимального діаметра є ключовим етапом у розробці пневмомеханічних систем подачі дрібного насіння.

Вплив діаметра отворів особливо важливий для дрібного насіння (до 3 мм), оскільки будь-яке відхилення більше 0,05 мм значно знижує ефективність сортування і може призводити до збільшення втрат.

На рис. 7 наведено «тепловий графік», який показує комбінований вплив кута нахилу лотка та швидкості подачі на відсоток втрат повноцінного насіння. Зі зміною кута нахилу та швидкості подачі змінюється ефективність подачі та точність сортування.

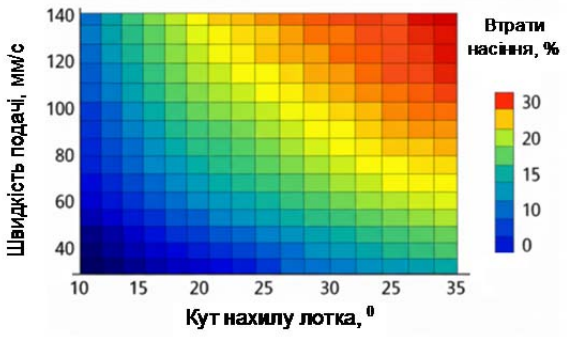


Рисунок 7 – Вплив кута нахилу лотка та швидкості подачі на втрати насіння ріпаку
Джерело: розроблено авторами

На графіку видно, що при малих кутах нахилу і низькій швидкості подачі втрати насіння мінімальні, але продуктивність системи низька. При великих кутах і високій швидкості втрати значно зростають через захоплення сусідніх насінин повітряним потоком.

Оптимальна зона на графіку виділена як область з найменшими втратами насіння (синьо-зелена ділянка), що демонструє необхідність балансування між швидкістю та кутом нахилу для забезпечення високої продуктивності та мінімізації втрат. Цей графік дозволяє вибирати оптимальні налаштування обладнання під конкретний тип дрібного насіння, підвищуючи ефективність сортування та зменшуючи виробничі втрати.

Висновки. Для ефективної фотосепарації дрібного насіння доцільно застосовувати пневмомеханічну систему подачі, яка поєднує доступність механічних рішень, надійність пневматики та мінімальний ризик пошкодження насіння.

Регулювання відстані між отворами барабана системи подачі дозволяє точно контролювати інтервал між насінинами під час їхнього руху через оптичну камеру. Це забезпечує оптимальні умови для фотографування зерен та точне відділення дефектного насіння струменем повітря від ежектора.

Впровадження такої системи підвищує якість сортування дрібного насіння, зменшує втрати повноцінного зерна та забезпечує стабільну роботу фотосепаратора при обробці насіння різних культур.

Дослідження виконано в рамках проекту 2025.02/0002 Розробити метод оптичного контролю якості процесу фракціонування зерна, що фінансується Національним фондом досліджень України (Конкурс на одержання щорічних грантів Президента України докторам наук (до 45 років включно) для проведення наукових досліджень і розробок.

Список літератури

1. Алієв Е. Б., Лупко К. О. Морфологічні характеристики та фізико-механічні властивості насіння дрібнонасіннєвих культур. *Конструювання виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. 2020. Вип. 50. С. 27–35. https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.35-41.
2. Овсянникова Л. К. Фізико-технологічні властивості сучасних сортів дрібнонасіннєвих культур. *Зернові продукти і комбікорми.* 2017. Вип. 17, №1. С. 9–15.
3. Спірін А. В., Цуркан О. В., Твердохліб І. В., Омельянов О. М. Шляхи інтенсифікації виробництва насіння трав. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. № 4 (103). С. 110–120. https://doi.org/10.37128/2306-8744-2021-4-12.
4. Бакум М. В., Крекот М. М., Михайлов А. Д. та ін. Дослідження ефективності пневматичного сепаратора з нахиленим каналом на підготовці насіннєвого матеріалу сафлору. *Вісник Львівського національного університету*. 2022. № 26. С. 28–35. https://doi.org/10.31734/agroengineering2021.25.02.
5. Степаненко С. П., Никифоров А. О. Дослідження впливу знакозмінного повітряного потоку на якість віброфрикційного розділення дрібнонасіннєвих матеріалів. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2024. № 24. С 52–68. https://doi.org/10.37700/ts.2024.24.52-68.
6. Алієв Е. Б. Обгрунтування конструктивно-режимних параметрів фотоелектронного сепаратора насіння соняшника. *Наукові горизонти*. 2019. № 5 (78). С. 23–30.
7. Cujbescu D, Nenciu F, Persu C, Găgeanu I, Gabriel G, Vlăduț N-V, Matache M, Voicea I, Pruteanu A, Bularda M, et al. Evaluation of an Optical Sorter Effectiveness in Separating Maize Seeds Intended for Sowing. Applied Sciences. 2023. Vol. 13(15). 8892. https://doi.org/10.3390/app13158892.
8. Sabanci K., Kayabasi A., Toktas A. Computer vision-based method for classification of wheat grains using artificial neural network. *Journal of the Science of Food and Agriculture*. 2017. Vol. 97. P. 2588–2593. https://doi.org/10.1002/jsfa.8080.
9. Stepanenko S., Kuzmych A., Kharchenko S., Borys A., Dnes V., Volyk D., Kalinichenko R. A machine vision approach for grain quality control during separation. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*, 2025. Vol. 12(1), P. E9–E17. https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(1).e2.
10. Stepanenko S., Kuzmych A., Borys A., Dnes V., Kharchenko S., Rogovskii I., Golub G., Berezovyi M., Lutsiuk A. Substantiating the YOLO11 architecture for determining the fractional composition of winter wheat grain mixtures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol 4, No. 2 (136). P. 81–92. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.338124.
11. Mensah B., Prasifka J., Hulke B., Monono E., Sun X. Detection of insect-damaged sunflower seeds using near-infrared hyperspectral imaging and machine learning. *Smart Agricultural Technology*. 2025. Vol. 12. 101110. https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101110.
12. Zade N., Gupte A., Gupta P., Detalle N., Mannion A., Voyle R. Spectral Feature Extraction and Ensemble Learning for Multiclass Aircraft Damage Identification. *MethodsX*. 2025. Vol. 15. 103625. https://doi.org/10.1016/j.mex.2025.103625.
13. Yang M., Shi Y., Song Q., Wei Z., Dun X., Wang Z., Cheng X. Optical sorting: past, present and future. *Light: Science & Applications*. 2025. Vol. 14(1), 103. https://doi.org/10.1038/s41377-024-01734-5.
14. Su C., Hong J., Wang J., Yang Y. Quick and Accurate Counting of Rapeseed Seedling with Improved YOLOv5s and Deep-Sort Method. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*. 2023. Vol. 92(9). P. 2611–2632. https://doi.org/10.32604/phyton.2023.029457.
15. Hardwick J., Morgan Z., Hirayama R. Acoustophoretic system for seed separation on conveyor belts. *Nature Communications*. 2025. Vol. 16, 6975. https://doi.org/10.1038/s41467-025-62006-3.
16. Nadolski S., Samuels M., Klein B., Hart C.J.R. Evaluation of bulk and particle sensor-based sorting systems for the New Afton block caving operation. *Minerals Engineering*. 2018. Vol 121. P 169–179. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.02.004.
17. Fei Y., Li Z., Zhu T., Chen Z., Ni C. Nondestructive detection and classification of impurities-containing seed cotton based on hyperspectral imaging and one-dimensional convolutional neural network, *Digital Communications and Networks*, 2025. Vol. 11, No. 2, P. 308–316, https://doi.org/10.1016/j.dcan.2024.05.008.

18. Hall W., Seagar A., Palmer S. Automatic grain texture analysis using integral transforms. *Holzforschung*. 2012. Vol. 66(2). P. 231–236. https://doi.org/10.1515/HF.2011.127.
19. Latif G., Bouchard K., Maitre J., Back A., Bédard L. P. Deep-Learning-Based Automatic Mineral Grain Segmentation and Recognition. *Minerals*. 2022. Vol. 12(4), 455. https://doi.org/10.3390/min12040455.
20. Lin F., Fang H., Liu H., Zhang Y., Jensen D. J., Hovad E. Automatic detection of grains in partially recrystallized microstructures using deep learning, *Materials Characterization*. 2025. Vol. 219, 114576. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2024.114576.
21. Cetin G., Fadali S. Optimal resource allocation in networked control systems using viterbi algorithm. Bulletin of Electrical *Engineering and Informatics*. 2021. Vol. 10, No. 3. P. 1524–1535. https://doi.org/10.11591/eei.v10i3.3022.
22. Steeneck D., Eng-Larsson F. The Baum-Welch algorithm with limiting distribution constraints. *Operations Research Letters.* 2018. Vol. 46 (6). P. 563–567. https://doi.org/10.1016/j.orl.2018.08.008.

References

1. Aliiev, E. B., & Lupko, K. O. (2020). Morphological characteristics and physical and mechanical properties of seeds of small-seeded crops. *Design, Production and Exploitation of Agricultural Machines*, 50, 27–35 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.35-41.
2. Ovsiannykova, L. K. (2017). Physico-technological properties of modern varieties of small-seeded crops. *Grain products and compound feeds*, 17 (1), 9–15 [in Ukrainian].
3. Spirin, A. V., Tsurkan, O. V., Tverdokhlib, I. V., & Omelianov, O. M. (2021). Ways to intensify the production of grass seeds. *Vibrations in engineering and technologies*, 4(103), 110–120 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.37128/2306-8744-2021-4-12.
4. Bakum, M., Krekot, M., Abduev, M., Mikhailov, A., Maiboroda, M., Chalaya, O., Bezpalko, B., et al. (2021). Study of the efficiency of a pneumatic separator with an inclined channel on the preparation of safflor seed material. *Bulletin of Lviv National Environmental University. Series Agroengineering Research*, 25, 28–35 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.31734/agroengineering2021.25.028.
5. Stepanenko, S. P., & Nykyforov, A. O. Research on impact of alternating air flow on quality of vibro-frictional separation of fine-seed materials. (2024). *Technical service of agriculture, forestry and transport*, 24, 52–68 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.37700/ts.2024.24.52-68.
6. Aliiev, E. (2019). Justification of constructive-mode parameters of a photo-electron separator of sunflower seeds. *Scientific Horizons*, 22(5), 23–30 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.33249/2663-2144-2019-78-5-23-30.
7. Cujbescu, D., Nenciu, F., Persu, C., Găgeanu, I., Gabriel, G., Vlăduț, N.-V., Matache, M., et al. (2023). Evaluation of an Optical Sorter Effectiveness in Separating Maize Seeds Intended for Sowing. *Applied Sciences*, 13(15), 8892. https://doi.org/10.3390/app13158892.
8. Sabanci, K., Kayabasi, A. & Toktas, A. (2017). Computer vision-based method for classification of wheat grains using artificial neural network. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 97, 2588–2593. https://doi.org/10.1002/jsfa.8080
9. Stepanenko S., Kuzmych A., Kharchenko S., Borys A., Dnes V., Volyk D., & Kalinichenko R. (2025). A machine vision approach for grain quality control during separation. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*, 12(1), E9–E17. https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(1).e2.
10. Stepanenko, S., Kuzmych, A., Borys, A., Dnes, V., Kharchenko, S., Rogovskii, I., Golub, G., et al. (2025). Substantiating the YOLO11 architecture for determining the fractional composition of winter wheat grain mixtures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4(2 (136), 81–92. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.338124.
11. Mensah, B., Prasifka, J., Hulke, B., Monono, E., & Sun, X. (2025). Detection of insect-damaged sunflower seeds using near-infrared hyperspectral imaging and machine learning. *Smart Agricultural Technology*, 12, 101110. https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101110.
12. Zade, N., Gupte, A., Gupta, P., Detalle, N., Mannion, A., & Voyle, R. (2025). Spectral Feature Extraction and Ensemble Learning for Multiclass Aircraft Damage Identification. *MethodsX*. 15. 103625. https://doi.org/10.1016/j.mex.2025.103625.
13. Yang, M., Shi, Y., Song, Q., Wei, Z., Dun, X., Wang, Z., Cheng, X., et al. (2025). Optical sorting: past, present and future. *Light: Science & Applications*, 14(1), 103. https://doi.org/10.1038/s41377-024-01734-5.
14. Su, C., Hong, J., Wang, J., & Yang, Y. (2023). Quick and Accurate Counting of Rapeseed Seedling with Improved YOLOv5s and Deep-Sort Method. *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 92(9), 2611–2632. https://doi.org/10.32604/phyton.2023.029457.
15. Hardwick, J., Morgan, Z. & Hirayama, R. (2025). Acoustophoretic system for seed separation on conveyor belts. *Nature Communications*, 16, 6975. https://doi.org/10.1038/s41467-025-62006-3.

16. Nadolski, S., Samuels, M., Klein, B., & Hart, C.J.R. (2018). Evaluation of bulk and particle sensor-based sorting systems for the New Afton block caving operation, *Minerals Engineering*, 121, 169–179. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.02.004.
17. Fei, Y., Li, Z., Zhu, T., Chen, Z., & Ni, C. (2025). Nondestructive detection and classification of impurities-containing seed cotton based on hyperspectral imaging and one-dimensional convolutional neural network, *Digital Communications and Networks*, 11(2), 308–316. https://doi.org/10.1016/j.dcan.2024.05.008.
18. Hall, W., Seagar, A. & Palmer, S. (2012). Automatic grain texture analysis using integral transforms. *Holzforschung*, 66(2), 231–236. https://doi.org/10.1515/HF.2011.127.
19. Latif, G., Bouchard, K., Maitre, J., Back, A., & Bédard, L. P. (2022). Deep-Learning-Based Automatic Mineral Grain Segmentation and Recognition. *Minerals*, 12(4), 455. https://doi.org/10.3390/min12040455
20. Lin, F., Fang, H., Liu, H., Zhang, Y., Jensen, D. J., Hovad, E. (2025). Automatic detection of grains in partially recrystallized microstructures using deep learning, *Materials Characterization*, 219, 114576. https://doi.org/10.1016/j.matchar.2024.114576.
21. Cetin, G., Fadali, S. (2021). Optimal resource allocation in networked control systems using viterbi algorithm. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics*, 10(3), 1524–1535. https://doi.org/10.11591/eei.v10i3.3022.
22. Steeneck, D., Eng-Larsson, F. (2018). The Baum-Welch algorithm with limiting distribution constraints. *Operations Research Letters*, 46 (6), 563–567. https://doi.org/10.1016/j.orl.2018.08.008.

Serhii Stepanenko, Senior Researcher, DSc.
Institute of Mechanics and Automation of Agricultural Production, Hlevakha, Ukraine

Improvement of the Optical Sorting Process for Small-Seed Crops

The purpose of the study is to provide theoretical and practical justification for the use of a pneumatic seed feeding system in optical sorters to improve the accuracy of separating small-seed crops and increase the reliability of equipment in dusty conditions.

The study is devoted to solving the problem of low accuracy of photo-separation of small seeds caused by chaotic movement of particles under the action of air flows from ejectors. The shortcomings of existing gravitational and mechanical feeding systems in dusty conditions are analyzed. A design for a pneumatic-mechanical system is proposed, in which the use of a drum with calibrated holes ensures precise positioning of the seeds, and compressed air acts as a contactless ejector. It has been established that this approach combines high precision mechanical dosing with the reliability and low seed damage characteristic of pneumatic systems. For effective photo separation of small seeds, it is advisable to use a pneumatic-mechanical feeding system, which combines the accessibility of mechanical solutions, the reliability of pneumatics, and minimal risk of seed damage.

Adjusting the distance between the holes in the feeding system drum allows you to precisely control the interval between seeds as they move through the optical camera. This provides optimal conditions for photographing grains and accurately separating defective seeds with a jet of air from the ejector. The implementation of such a system improves the quality of small seed sorting, reduces the loss of full-fledged grains, and ensures stable operation of the photo separator when processing seeds of different crops.

small-seed crops, photo separator, feeding system, drum feeder, pneumatic-mechanical method, sorting accuracy

Одержано (Received) 26.02.2026 *Прорецензовано (Reviewed) 26.03.2026*
Прийнято до друку (Approved) 01.04.2026