

І.М. Бажан, С.М. Лещенко, доц., канд. техн. наук, **О.М. Васильковський**, проф., канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: igor23_81@ukr.net, leshchenkosm@kntu.kr.ua, olexa74@ukr.net*

Оцінка ефективності роботи решіт зерноочисних машин із зигзагоподібним розташуванням отворів

Робота присвячена підвищенню ефективності решітної сепарації зернового вороху шляхом застосування плоских коливальних решіт із зигзагоподібним розташуванням отворів. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю досягнення нормативних показників чистоти зерна за умов обмежених технологічних можливостей традиційного обладнання.

Розроблено математичну модель руху непрохідної частки вздовж отвору похилого решета, яка враховує сили тяжіння, тертя, нормальної реакції та опору шару зернового матеріалу. Отримано аналітичний розв'язок диференційного рівняння руху, що встановлює функціональну залежність швидкості переміщення частки від кута нахилу решета та кута відхилення отворів від поздовжньої осі. Встановлено критичну умову забезпечення стабільного транспортування зернової маси. Експериментальні дослідження виконано на лабораторному сепараторі з використанням зернового вороху озимої пшениці. Реалізовано центральний композиційний план другого порядку типу 2^3 з варіюванням питомої подачі, частоти коливань та кута відхилення осей отворів. Отримано адекватну регресійну модель із коефіцієнтом детермінації $R^2=0,94$.

За методом функції бажаності Харрінгтона встановлено раціональні параметри: питома подача 900...1000 кг/(м·год), частота коливань 450...480 кол./хв, кут відхилення отворів 9...10°. Порівняно з традиційними решетами запропонована конструкція забезпечує підвищення ефективності сепарації на 12...15%, зростання питомої продуктивності на 15...18%, зменшення забивання отворів на 20...25% та зниження питомих енергозатрат на 16...18%.

зерноочисні машини, решітна сепарація, зигзагоподібні отвори, ефективність очищення, питома продуктивність, математична модель, факторний експеримент, оптимізація параметрів

Постановка проблеми. Забезпечення продовольчої безпеки України безпосередньо пов'язане із якістю зерна, що надходить на зберігання та подальшу переробку. Після збирання врожаю зернозбиральними комбайнами зерновий ворох містить значну кількість домішок як органічного, так і мінерального походження [1]. За даними досліджень багатьох вітчизняних вчених [2, 5, 8], масовий вміст прохідних часток у післякомбайновому збіжжі становить 10-15%, а при застосуванні сучасної налагодженої збиральної техніки може бути ще меншим [1]. Наявність домішок погіршує якість врожаю, знижує схожість зерна, сприяє розвитку мікроорганізмів при зберіганні, ускладнює наступні етапи переробки та негативно впливає на товарну цінність вирощеної продукції рослинництва.

Основною операцією післязбиральної обробки врожаю є очищення зерна на машинах загального призначення. ДСТУ 3768:2019 обмежує вміст домішок до 1-2%, проте традиційні плоскі решета з паралельним розташуванням отворів мають обмежені можливості щодо досягнення таких показників, особливо при роботі з вологим матеріалом [3]. Серед різних технологій видалення домішок найпоширенішим залишається решітне очищення, яке базується на розділенні компонентів зернової суміші за розмірами частинок.

Дійсними критеріями оцінки ефективності роботи зерноочисних машин є параметри технологічної ефективності – продуктивність, яка впливає на швидкість здійснення операції, та ефект очистки (повнота розділення), що характеризує якість її виконання [2, 4]. Важливим показником ефективності роботи решітних частин зерноочисних машин є питома продуктивність на одиницю ширини або площі решітної поверхні. Збільшення питомої подачі дозволяє підвищити продуктивність машини без зростання її габаритів, маси тощо, тобто інтенсифікувати процес сепарації без додаткових капітальних витрат на обладнання.

Сучасний стан проблеми характеризується суперечністю між зростаючими вимогами до якості зерна та обмеженими можливостями традиційного обладнання. Існуючі решета демонструють недостатню інтенсивність сепарації, значну схильність до забивання отворів, особливо при очищенні вологого матеріалу, а також нераціональне використання робочої поверхні. Частина площі решета залишається незадіяною для активної сепарації, що обмежує загальну продуктивність решіт. При високочастотних режимах коливань проблема забивання отворів стає ще більш гострою, що призводить не тільки до зниження якості очищення, але й до ймовірності додаткового травмування зерна [5].

Аналіз конструкцій сучасних зерноочисних машин підтверджує, що основними проблемами, які виникають при роботі класичних решіт, є: забивання отворів довгими або плоскими домішками, що знижує ефективність сепарації та потребує частих зупинок для очищення; недостатня інтенсифікація сепарації при прямому розташуванні отворів через обмежений рух частинок переважно у вертикальному напрямку; нераціональне використання робочої поверхні решета; підвищене травмування зерна при спробах інтенсифікації процесу через високочастотні коливання.

Перспективним напрямом підвищення ефективності післязбиральної обробки є застосування решіт із зигзагоподібним розташуванням отворів, які забезпечують активізацію внутрішньосферних процесів переміщення часток та інтенсифікацію процесу орієнтації прохідних часток відносно робочих отворів [6, 7]. Характерною особливістю такої конструкції є відхилення осей отворів від поздовжньої осі решета на певний кут, що створює додаткові траєкторії руху часток у поперечному напрямку. За рахунок цього, частинки, які знаходяться над поздовжніми перетинками решета, отримують можливість переміщення до отворів не лише під дією вертикальних коливань, але й через направляючу дію нахилених отворів.

Однак широке впровадження у виробництво подібних конструкцій стримується недостатньою вивченістю кінематики та динаміки руху зернового матеріалу по зигзагоподібній поверхні, а також відсутністю науково обґрунтованих рекомендацій щодо оптимальних конструктивних параметрів та режимів роботи решіт із зигзагоподібним розташуванням отворів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема руху та розділення зернового матеріалу на решітних поверхнях активно досліджується науковцями, серед яких виділяються роботи Б.І. Котова, Л.М. Тіщенко, О.І. Завгороднього, С.П. Степаненка, О.В. Богомоллова, С.О. Харченка, Е.Б. Алієва. Аналіз сучасного стану досліджень розділення матеріалів на решетах дозволяє виділити кілька основних напрямків робіт, кожен з яких дозволяє поліпшити роботу решітних частин зерноочисних машин, однак ряд питань щодо якості роботи, габаритних розмірів решітних станів, необхідної амплітуди та частоти коливань, питомого зернового навантаження, конструктивних параметрів і навіть матеріалу виготовлення решіт залишаються не вирішеними.

Значний внесок у розвиток теорії вібраційної сепарації зроблено київською та харківською науковими школами. Тіщенко Л.М. у дисертаційному дослідженні

розробив наукові основи процесів вібровідцентрового розділення зернових сумішей, показавши, що підвищення частоти і зменшення амплітуди коливань дозволяє отримати необхідну віброгустину оброблюваного матеріалу для суттєвої активізації внутрішньопарових процесів [8]. Автор встановив, що при правильно підібраних параметрах вібрації можливе досягнення режиму псевдозрідження зернової маси, що значно полегшує проходження дрібних часток крізь отвори решета.

Котов Б.І., Степаненко С.П. та Пастушенко М.Г. проаналізували тенденції розвитку конструкцій машин для очищення і сортування зерноматеріалів, наголосивши на можливості досягнення значного приросту питомої подачі без зниження якості очищення зерна [9]. Дослідники показали, що оптимізація кінематичних параметрів дозволяє підвищити продуктивність на 20-30% порівняно з серійними конструкціями.

Ольшанський В.П. розглянув рух неоднорідної дрібнозернистої суміші по плоскому віброрешету, встановивши основні закономірності динаміки процесу [10]. Автор розробив математичну модель, що описує траєкторії руху часток різної маси та розмірів під дією вібраційних коливань, однак модель не враховувала вплив геометрії розташування отворів на характер руху.

Bracasescu C., Gageanu I., Popescu S. та Selvi K.C. дослідили процес відокремлення домішок від повноцінних насінин з використанням вібруючих решіт у потоках повітря [11]. Дослідження підтвердили, що комбінація механічної вібрації та пневматичного впливу на збіжжя може підвищити ефективність сепарації на 15-25%, що насамперед є характерним для легких домішок.

Богомолів О.В. провів аналіз конструкцій сепараторів для сепарації важкороздільних зернових сумішей, виявивши основні напрямки удосконалення обладнання [12]. Автор класифікував існуючі технічні рішення та визначив перспективні шляхи розвитку.

Однак при високочастотних вібраціях створюється проблема суттєвого збільшення забивання отворів решіт, що окрім зниження якості сепарації призводить до пошкодження або травмування зерна. Завгородній О.І. у дисертаційному дослідженні розробив наукові основи процесів очищення отворів решіт зерноочисних машин, детально вивчивши масштабність проблеми блокування отворів частками зерноsumішей [5]. Автор встановив, що при частотах коливань понад 600 кол./хв блокування отворів може досягати 40-50% від загальної кількості, що суттєво знижує ефективність роботи решета.

Значний внесок у розвиток теорії сепарації зроблено у роботах, присвячених дослідженню нетрадиційних форм отворів решіт. Kharchenko S., Borshch Y., Kovalyshyn S. та ін. встановили можливості інтенсифікації просіювання зернових сумішей крізь отвори епіциклоїдної форми, показавши суттєве збільшення швидкості проходження зернової суміші порівняно з традиційними круглими отворами [13]. Дослідження показали, що криволінійна форма отворів зменшує ймовірність заклинювання часток на краях отворів.

Kharchenko S. розробив математичну модель динаміки зернових сумішей, що базувалася на гідроаналогії [14]. Модель дозволила прогнозувати швидкість проходження часток через отвори різної форми, однак була обмежена припущенням про ідеальну текучість зернової маси.

Дискретно-елементне моделювання (DEM) стало потужним інструментом для вивчення процесів сепарації на рівні окремих часток. Chen Y.H. та Tong X. використали тривимірне DEM-моделювання для дослідження зв'язку між вібраційними параметрами та ефективністю просіювання [15], а також для моделювання ефективності просіювання з вібраційними параметрами [16]. Автори встановили

оптимальні співвідношення частоти та амплітуди коливань для різних типів зернових матеріалів.

Cleary P.W. розробив масштабні промислові DEM-моделі для прогнозування руху часток у сепараційних процесах [17] та прогнозування зв'язаних потоків часток і рідини [18]. Дослідження дозволили візуалізувати процеси взаємодії часток з решетом на мікрорівні та виявити механізми блокування отворів.

Wang G. і Tong X. досліджували проходження часток через отвори решета з використанням методу дискретних елементів [19]. Автори встановили, що ймовірність проходження частки залежить не тільки від співвідношення розмірів частки та отвору, але й від кута підходу частки до отвору.

Окремий напрямок досліджень присвячений використанню додаткових пристроїв-сегрегаторів для інтенсифікації процесу сепарації. Котов Б.І., Степаненко С.П. та Калініченко Р.А. теоретично обґрунтували рух частинки зерна на вібропневморешеті при дії розпушуючих робочих органів [20]. Автори встановили, що використання гребінок або щіток дозволяє розпушити верхні шари зернової маси та створити умови для проходження дрібних часток до отворів.

Степаненко С.П. проаналізував взаємодію пасивного розпушувача із віброзрідженим зерновим шаром [21], вивчив вплив параметрів пасивних розпушувачів на ефективність вібропневматичної сепарації зерна [22]. Дослідження показали, що оптимальна відстань між розпушувачами становить 80...120 мм, а їх висота над поверхнею решета – 15...25 мм.

Недоліком використання додаткових пристроїв є зменшення площі живого перерізу решета на 10...15%, ускладнення конструкції додатковими компонентами, збільшення неврівноваженої маси, що може призводити до розбалансування механізму приводу при певних подачах. Крім того, розпушувачі вимагають регулярного обслуговування та очищення, що підвищує експлуатаційні витрати.

Певний прогрес в очищенні зернових матеріалів на решетах досягнуто шляхом створення умов неврівноваженості або нестійкої рівноваги часток на поверхні між отворами решіт. Так, в роботі [23] розроблено конструкцію та обґрунтовано параметри відцентрового решітного сепаратора зерна. У запропонованій конструкції решето виконано у вигляді циліндра, що обертається, а зернова маса подається всередину циліндра. Відцентрова сила притискає частки до решета, при цьому дрібні частки проходять через отвори під дією сил гравітації.

Співавтори даної статті працювали і над створенням концепції «ідеального» решета зернового сепаратора [24]. В ході проведення досліджень запропоновано використання струнних решіт, у яких поздовжні перетинки виконані з натягнутих струн, що вібрують з високою частотою. Це створює умови нестабільної рівноваги для часток, які знаходяться між отворами.

Характерним недоліком цього напрямку зі створення умов неврівноваженості часток на решітних поверхнях є складність конструкції та необхідність використання прецизійних технологій виготовлення. Струнні решета вимагають високоточного натягу струн та їх періодичного підтягування у процесі експлуатації, що ускладнює обслуговування обладнання.

Окрема група досліджень присвячена вивченню блокування отворів решета як одного з найбільш критичних факторів, що обмежують ефективність сепарації. Lawinska K., Wodzinski P. та Modrzewski R. розробили метод визначення ступеня блокування отворів решета [25] та математичний опис блокування решета [26]. Було встановлено, що процес блокування є складним, значною мірою випадковим і важким для математичного опису через велику кількість факторів, що впливають на нього.

Автори виявили, що основними факторами, які впливають на інтенсивність блокування, є: форма та розміри отворів, вологість матеріалу, наявність довгих та плоских часток, частота коливань решета, товщина шару матеріалу на решеті. В ході проведення досліджень підтверджено, що при вологості матеріалу понад 18% інтенсивність блокування зростає в 2-3 рази порівняно з сухим матеріалом. Однак питання впливу геометрії розташування отворів на інтенсивність їх блокування компонентами зерноsumіші залишається недостатньо вивченим.

Досить оригінальний спосіб інтенсифікації процесу сепарації на решетах запропоновано авторським колективом під керівництвом Бакума М.В., який полягає у наданні решітному полотну поперечних коливань поряд з класичними поздовжніми [27]. При певних співвідношеннях амплітуд і частот поздовжніх та поперечних коливань відбувається активізація внутрішньшарових процесів одночасно у двох площинах, що дозволяє підвищити показники технологічної ефективності на 20-30%.

Недоліком запропонованого способу є складність приводу такого решітного стану та питання надійності роботи, особливо в складі пересувних зерноочисних машин. Для реалізації двовимірних коливань необхідно використовувати два незалежні вібратори, синхронізація роботи яких потребує складної системи управління.

Більш простий спосіб активізації внутрішньшарових процесів запропоновано колективом вчених під керівництвом Харченка С.О., у якому активізація досягається специфічними виштампівками та вирізами-канавками, які починаються у площині отворів і спрямовані у бік поздовжніх перетинків [28]. Завдяки їх наявності частки, що знаходяться над поздовжніми перетинками, потрапляють до канавок і спрямовуються до отворів.

Даний спосіб дозволяє мінімізувати зміни конструкцій решітних сепараторів і механізмів їх приводу, оскільки удосконалення стосується лише решітного полотна. Недоліками є відносна складність виготовлення решета, оскільки штампування малих за розмірами вирізів-канавок вимагає прецизійної точності обладнання, а також відсутність даних щодо надійності і довговічності таких решіт.

Попри значні досягнення у вивченні процесів сепарації, залишається низка невирішених питань. По-перше, відсутня комплексна математична модель руху зернового матеріалу по похилому решету із зигзагоподібно розташованими отворами, яка б враховувала не тільки геометрію поверхні, але й опір шару зернового матеріалу. По-друге, не встановлено аналітичні залежності між кутом відхилення отворів від поздовжньої осі решета та кінематичними параметрами руху часток. По-третє, потребує експериментального підтвердження вплив геометрії розташування отворів на ефективність сепарації в реальних виробничих умовах. По-четверте, не визначено раціональні значення конструктивних параметрів та режимів роботи решіт із зигзагоподібним розташуванням отворів.

Постановка завдання. Виходячи з наведеного, метою дослідження є підвищення ефективності попереднього та первинного решітного очищення зернового вороху шляхом розробки теоретичних основ та експериментального обґрунтування параметрів плоских коливальних решіт із зигзагоподібним розташуванням отворів.

Виклад основного матеріалу. Для теоретичного обґрунтування параметрів решета розглянемо зернову масу і процес її переміщення по поверхні похилого решета, що має зигзагоподібно розташовані робочі отвори згідно патенту на корисну модель № 154304 [29]. Формально вся зернова маса складається з прохідних і непрохідних часток, причому прохідних у зерновій суміші на порядок менше. Відомо [30], що в сукупності максимальний масовий вміст прохідних часток становить близько 10...15%. Це дає підстави зосередитися на аналізі руху крупних непрохідних часток, які здійснюють основний вплив на швидкість переміщення маси та створюють умови для проходження дрібних часток через отвори решета.

Решето встановлене під поздовжнім кутом α до горизонту. Прямокутні отвори розташовані зигзагоподібно, під кутом $\pm\beta$ до поздовжньої осі решета, причому в сусідніх рядах отвори мають протилежний нахил, що створює характерне зигзагоподібне розміщення рядів отворів на робочій поверхні решета. Процес переміщення часток по решету можна умовно розділити на п'ять фаз, які циклічно повторюються: надходження на поверхню, контакт з отвором, зміна напрямку руху, переміщення до наступного отвору, орієнтація відносно отвору.

Частки зернового матеріалу потрапляють на сепаруючу поверхню решета, маючи початкову швидкість U_0 , напрям якої співпадає з поздовжньою віссю решета. На частку нижнього шару, яка контактує з поверхнею решета, діють наступні сили (рис. 1):

- сила тяжіння $P = m \cdot g$, яка спрямована вертикально донизу;
- сила тертя F_{mp} , направлена проти вектора швидкості руху частки;
- сила опору шару $F_{ш}$, яку при незначних швидкостях руху приймемо пропорційною швидкості частки;
- сила нормальної реакції N , направлена перпендикулярно до решітної поверхні.

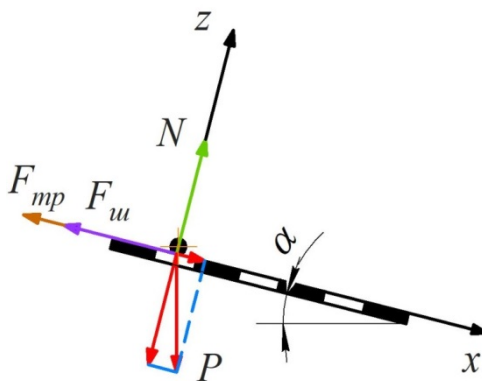


Рисунок 1 – Схема сил, що діють на частку під час руху по поверхні решета

Джерело: розроблено авторами із використанням [6, 7]

Провівши ранжування діючих факторів за відомою методикою [7], на даному етапі дослідження знехтуємо силою опору повітря внаслідок її несуттєвого впливу на динаміку частки при малих швидкостях переміщення (до 0,5 м/с), а також коливаннями решета, прийнявши в якості рушія переміщення матеріалу у поздовжньому напрямку еквівалентно збільшений кут встановлення решета до горизонту α .

Диференціальне рівняння руху непрохідної частки вздовж прямокутного отвору решета з урахуванням дії опору шару має вигляд:

$$m \frac{dv}{dt} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha - \beta) - F_{mp} - F_{ш}, \quad (1)$$

де α – кут нахилу решета до горизонталі, град; β – кут відхилення отвору до поздовжньої осі решета, град; m – маса частки, кг; v – швидкість руху частки, м/с.

Сила тертя визначається за класичною формулою:

$$F_{mp} = \mu \cdot N = \mu \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha - \beta), \quad (2)$$

$$F_{ш} = \mu N = \mu m g \cos(\alpha - \beta)$$

де μ – коефіцієнт тертя зерна по поверхні решета (для пшениці по сталі $\mu = 0,35 - 0,45$).

Силу опору шару зернового матеріалу при незначних швидкостях переміщення можна представити як:

$$F_{uu} = k \cdot v, \quad (3)$$

де k – коефіцієнт опору шару зернового матеріалу, який чинить опір частці, що рухається вздовж отвору, кг/с. Цей коефіцієнт залежить від товщини шару, щільності укладання зерна та його фізико-механічних властивостей.

З урахуванням виразів для сили тертя та сили опору шару, диференціальне рівняння руху набуває вигляду:

$$m \frac{dv}{dt} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha - \beta) - \mu \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha - \beta) - k \cdot v. \quad (4)$$

Розділимо праву частину рівняння на m та проведемо перетворення, маємо:

$$\frac{dv}{dt} = g [\sin(\alpha - \beta) - \mu \cdot \cos(\alpha - \beta)] - \frac{k}{m} \cdot v. \quad (5)$$

Враховуючи, що $tg\varphi = \mu$, де φ – кут тертя, вираз можна записати через різницю кутів:

$$\frac{dv}{dt} = g [\sin(\alpha - \beta) - \sin\varphi \cdot \cos(\alpha - \beta) / \cos\varphi] - \frac{k}{m} \cdot v. \quad (6)$$

Позначивши $A = g [\sin(\alpha - \beta) - \mu \cdot \cos(\alpha - \beta)]$ та $B = k/m$, отримуємо стандартне лінійне диференціальне рівняння першого порядку:

$$\frac{dv}{dt} + B \cdot v = A. \quad (7)$$

Розв'язок рівняння (7) при початковій умові $v(0) = v_0$ має вигляд:

$$v = \frac{A}{B} + \left(v_0 - \frac{A}{B} \right) e^{-Bt}. \quad (8)$$

Для отримання зв'язку швидкості з переміщенням представимо $\frac{dv}{dt} = v \frac{dv}{dx}$.

Підставивши це у вихідне диференціальне рівняння та розділивши змінні, після інтегрування отримаємо:

$$v^2 = v_0^2 + 2 \frac{A}{B} x - 2 \frac{A}{B^2} \left(1 - e^{-Bx/v_0} \right). \quad (9)$$

При достатньо великих значеннях x експоненційний член прямує до нуля, і залежність (9) спрощується до вигляду:

$$v^2 \approx v_0^2 + 2 \frac{A}{B} x. \quad (10)$$

Аналіз отриманих залежностей дозволяє встановити наступні закономірності процесу:

- при збільшенні кута нахилу решета α швидкість руху часток зростає за рахунок збільшення складової сили тяжіння, що діє вздовж поверхні решета. Це підвищує інтенсивність сепарації через більш активне переміщення зернової маси, однак може призводити до зменшення часу контакту часток з отворами;

- збільшення кута відхилення отворів β зменшує швидкість переміщення зернової маси. В ході досліджень встановлено, що при $\alpha = 6...8^\circ$ зростання β від 0° до 10° призводить до зменшення швидкості руху зерна по решету на $5...10\%$. Це сповільнення є позитивним фактором, оскільки збільшує час контакту часток з отворами та підвищує ймовірність проходження дрібних (прохідних) часток;

- для забезпечення стабільного переміщення зернової маси необхідно дотримуватись критичної умови: $\alpha - \beta > \varphi$, де φ – кут тертя зерна по решету. При

порушенні цієї умови частки можуть зупинятися на поверхні решета, що призводить до накопичення матеріалу та зниження ефективності сепарації;

- за умови, якщо $\alpha = 30^\circ$ і $\beta = 10^\circ$ частка зупиняється вже на відстані 13...14 мм, що обмежує застосування значних кутів відхилення отворів решета при невеликих кутах нахилу робочої поверхні решета. Це має важливе практичне значення для проектування зерноочисних машин різного призначення.

Характерною особливістю функціонування решета із зигзагоподібними отворами є забезпечення більш повного відокремлення зернового матеріалу. Частинки, які не проходять у отвори при первинному контакті, завдяки подальшому переміщенню по поверхні гарантовано потрапляють у отвори за рахунок поперечної складової руху. Це досягається завдяки нахилу отворів відносно поздовжньої осі та чергуванню отворів з лівим і правим нахилом у шаховому порядку, що створює зигзагоподібну траєкторію переміщення часток.

Розміщення отворів під нахилом створює ефект «направляючої» або «керуючої» дії на частинки зернового матеріалу, що призводить до наступних технологічних переваг:

Зменшення забивання отворів. Нахилені отвори менш схильні до забивання, оскільки частинки мають більшу ймовірність пройти крізь них, а не застрягнути на краях. Це особливо важливо для щілинних отворів, де нахил може значно покращити прохідність довгих домішок типу половинок стебел, колосків тощо.

Інтенсифікація сепарації. Нахил отворів у поєднанні з коливальним рухом решета створює більш складні траєкторії руху часток, що сприяє кращому розділенню суміші. Зокрема, це покращує відділення легких домішок, які під дією повітряних потоків та коливань можуть переміщуватися через прямо розташовані отвори без проходження.

Збільшення ефективної площі просіювання. Шаховий порядок розміщення отворів з нахилом у різні сторони дозволяє більш раціонально використовувати робочу поверхню решета. Це фактично збільшує кількість активних зон просіювання на одиницю площі, що потенційно може призвести до підвищення питомої продуктивності на 15-20%.

Експериментальні дослідження проводилися на лабораторному сепараторі Petkus Wutha K 294A у лабораторії кафедри сільськогосподарського машинобудування Центральноукраїнського національного технічного університету. Вибір даного обладнання обумовлено можливістю відтворення технологічних режимів, з якими працюють зерноочисні машини загального призначення у реальних виробничих умовах.

Лабораторний сепаратор Petkus Wutha K 294 A являє собою віброповітряний сепаратор з плоским коливальним решетом. Основні технічні характеристики: ширина робочої частини решета 200 мм, довжина 600 мм, діапазон регулювання частоти коливань 300...600 кол./хв, максимальна продуктивність до 300 кг/год. Сепаратор обладнано регульованим живильним пристроєм, що дозволяє забезпечити стабільну подачу матеріалу в широкому діапазоні, та механічним струшувачем-очисником решета для запобігання забиванню отворів.

Перед реалізацією експериментальних досліджень проведено калібрування сепаратора щодо: продуктивності подачі зернового вороху на очищення в діапазоні 100...300 кг/год з точністю $\pm 2\%$; кута нахилу решітного стану в діапазоні $3...8^\circ$ з точністю $\pm 0,5^\circ$; амплітуди коливання в діапазоні 3...8 мм з точністю $\pm 0,2$ мм; частоти коливання в діапазоні 300...600 кол./хв з точністю ± 5 кол./хв.

Для досліджень використовували зерновий ворох озимої пшениці сорту Подолянка природної вологості 14...15% врожаю 2025 року, який отримано після зернозбирального комбайна класичної схеми обмолоту на полях ФГ «ЛПК». Фізико-механічні властивості матеріалу: середній розмір зернівок за довжиною 6,8 мм, за

шириною 3,4 мм, за товщиною 2,8 мм; маса 1000 зерен 42 г; натура 774 г/л; вміст основного зерна 88-90%, сміттевої домішки 6-8%, зернової домішки 4-6%.

З метою виключення забивання отворів решіт та підвищення однорідності і точності експериментів з вороху попередньо видаляли частки, які застрягали в отворах при підготовці матеріалу до експериментальних досліджень: половинки та четвиртинки зерен, окремі довгі стебла завдовжки понад 30 мм, плоскі лусочки тощо. Це дозволило скоротити загальний час на проведення експериментів та підвищити стабільність результатів. Крім того, контролювали вміст прохідної фракції в діапазоні 8...12%, що є характерним для зернових матеріалів, з якими працюють зерноочисні машини загального призначення у виробничих умовах.

Виготовлено три варіанти дослідних решіт з кутами відхилення осей отворів $\beta = 0^\circ$; $\beta = 5^\circ$ та $\beta = 10^\circ$. Решета мали наступні ідентичні геометричні параметри: довжина отворів $l = 10$ мм, ширина отворів $b = 2,2$ мм, товщина поздовжніх перетинок 2 мм, товщина поперечних перетинок 8 мм, крок розміщення отворів у поздовжньому напрямку 10 мм, крок у поперечному напрямку 12 мм. Матеріал решіт – листовая сталь товщиною 1 мм. Коефіцієнт живого перерізу для всіх варіантів решіт становив 0,28-0,30.

Для планування експерименту використано метод центрального композиційного плану другого порядку типу 2^3 , що дозволяє отримати регресійну модель з урахуванням взаємодії факторів. Після попереднього ранжування на основі аналізу літературних джерел та попередніх експериментів обрано три найбільш впливові фактори, діапазони варіювання яких встановлено на основі попередніх досліджень та представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Рівні варіювання факторів

Фактор	$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
x_1 – питома подача q_b , кг/(м·год)	520	600	900	1200	1280
x_2 – частота коливань n , кол./хв	315	350	450	550	585
x_3 – кут відхилення осей отворів β , град	-1	0	5	10	11

Критерієм оптимізації обрано ефективність сепарації Y , яка визначалася як повнота виділення прохідної фракції:

$$Y = \frac{Q_{\text{прох}}}{Q_{\text{заг}}} \times 100\%, \quad (11)$$

де $Q_{\text{прох}}$ – маса виділеної прохідної фракції через решето, кг; $Q_{\text{заг}}$ – загальна маса прохідної фракції у вихідному матеріалі, визначена методом ситового аналізу, кг.

Методика проведення окремого дослідження включала наступні операції: підготовка навіски вихідного матеріалу масою 5 кг; встановлення необхідних параметрів роботи сепаратора згідно плану експерименту; завантаження матеріалу у бункер-живильник; проведення сепарації з фіксацією часу процесу; збирання та зважування прохідної та непрохідної фракцій з точністю до 1 г; ситовий аналіз непрохідної фракції для визначення втрат зерна; розрахунок показника ефективності сепарації.

Реалізовано 16 дослідів згідно центрального композиційного плану: 8 дослідів у вершинах куба (базовий план 2^3), 6 зіркових точок на осях ($\pm\alpha = \pm 1,682$), 2 дослідів в центрі плану для оцінки помилки експерименту. Кожен дослід повторювався тричі, результати усереднювалися для підвищення статистичної достовірності. Загальна кількість експериментальних точок склала 48.

Статистична обробка результатів проводилася з використанням програмного забезпечення STATISTICA 12 із застосуванням методів регресійного аналізу, перевірки адекватності моделі за критерієм Фішера та аналізу значущості коефіцієнтів регресії за критерієм Стьюдента при рівні значущості 0,05.

За результатами експериментів отримано регресійну модель другого порядку, що описує залежність ефективності сепарації від досліджуваних факторів:

$$Y = 74,2 + 4,8x_1 + 2,1x_2 + 6,3x_3 - 3,2x_1^2 - 1,8x_2^2 - 2,4x_3^2 + 0,9x_1x_2 - 0,7x_1x_3 + 0,5x_2x_3. (12)$$

Перевірка адекватності моделі за критерієм Фішера показала задовільну збіжність експериментальних та розрахункових даних: $F_{\text{розр}}=2,34 < F_{\text{табл}}=3,29$ при рівні значущості 0,05. Коефіцієнт детермінації $R^2=0,94$ свідчить про високу якість отриманої моделі. Перевірка за критерієм Стьюдента показала статистичну значущість усіх лінійних та квадратичних членів рівняння, тоді як ефекти взаємодії виявилися менш значущими.

Аналіз впливу факторів на ефективність сепарації та графічних залежностей (рис. 2, 3, 4) дозволив встановити наступні закономірності:

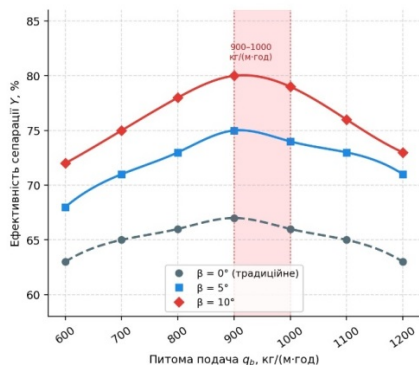


Рисунок 2 – Залежність ефективності сепарації від питомої подачі при різних кутах відхилення отворів

Джерело: розроблено авторами

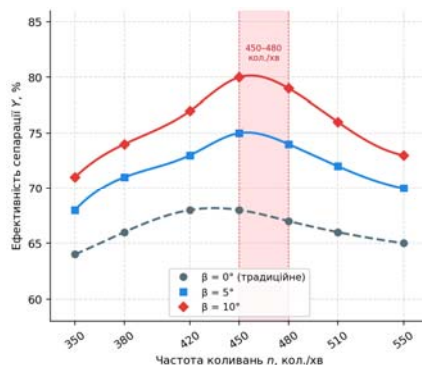


Рисунок 3 – Залежність ефективності сепарації від частоти коливань решета при різних кутах відхилення отворів

Джерело: розроблено авторами

Вплив питомої подачі (x_1). Збільшення питомої подачі від 600 до 900 кг/(м·год) призводить до зростання ефективності сепарації з 68% до 79%. Це пояснюється тим, що при малих подачах шар матеріалу на решеті є недостатньо товстим для створення необхідного тиску, що сприяє проходженню часток через отвори. При оптимальній товщині шару (15...25 мм) створюються найкращі умови для сепарації: достатній тиск верхніх шарів на нижні без надмірного ущільнення маси.

Подальше збільшення питомої подачі понад 1000 кг/(м·год) призводить до зниження ефективності до 72% через перевантаження решітної поверхні. При надмірних подачах товщина шару перевищує 35...40 мм, що призводить до ущільнення нижніх шарів, зменшення рухливості часток та збільшення часу, необхідного для проходження дрібних часток до отворів. Крім того, при великих товщинах шару зростає ймовірність проходження часток основного зерна через отвори разом з дрібними домішками, що знижує селективність процесу.

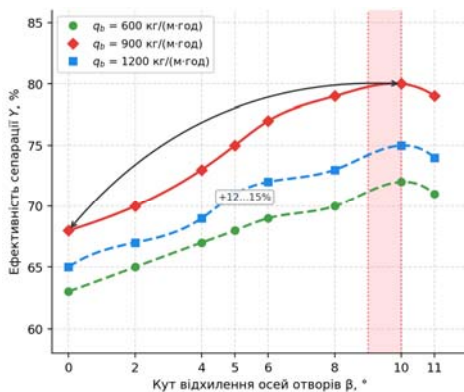


Рисунок 4 – Залежність ефективності сепарації від кута відхилення осей отворів при різних значеннях питомої подачі

Джерело: розроблено авторами

Вплив частоти коливань (x_2). Рациональна частота коливань становить 450...500 кол./хв, при якій досягається ефективність 77...80%. При цих параметрах забезпечується найкраще співвідношення між інтенсивністю розпушування зернової маси та часом контакту часток з поверхнею решета.

При менших частотах (350 кол./хв) ефективність знижується до 70% через недостатню інтенсивність розпушування матеріалу. Зернова маса рухається більш монолітним шаром з обмеженими внутрішньосферними переміщеннями, що зменшує ймовірність потрапляння дрібних часток до отворів.

При вищих частотах (550 кол./хв) ефективність також знижується до 73% через надмірну вібрацію та зменшення часу контакту часток з отворами. При високих частотах частки можуть «відскакувати» від поверхні решета, проводячи значну частину часу в підвищеному стані без контакту з отворами. Крім того, високочастотна вібрація може призводити до ущільнення матеріалу та збільшення інтенсивності забивання отворів.

Вплив кута відхилення отворів (x_3). Найбільш суттєвий вплив на ефективність сепарації має кут відхилення осей отворів від поздовжньої осі решета. Збільшення β від 0° до 10° підвищує ефективність на 8...16% залежно від значень інших факторів. Цей ефект пояснюється створенням додаткових траєкторій руху часток у поперечному напрямку, що збільшує ймовірність контакту дрібних часток з отворами.

При $\beta = 0^\circ$ (традиційне решето з поздовжніми отворами) ефективність становила 64...70%. У цьому випадку переважає поздовжній рух часток, а поперечне переміщення носить випадковий характер, що обмежує можливості часток, які знаходяться над перетинками, досягти отворів.

При $\beta = 5^\circ$ ефективність зростає до 71...76%. Помірний нахил отворів створює направлену поперечну складову руху без суттєвого уповільнення загального переміщення зернової маси вздовж решета.

При $\beta = 10^\circ$ досягається максимальна ефективність 77...80%. Оптимальний кут відхилення забезпечує баланс між інтенсифікацією поперечного переміщення часток та збереженням достатньої швидкості поздовжнього руху. Зигзагоподібна траєкторія руху часток забезпечує практично 100% ймовірність контакту кожної дрібної частки з отворами на довжині решета.

Подальше збільшення кута відхилення понад 12° недоцільне, оскільки призводить до надмірного уповільнення поздовжнього руху зернової маси, що може викликати накопичення матеріалу на початку решета та зниження загальної продуктивності сепаратора.

Взаємодія між факторами виявилася статистично незначущою, що підтверджує їхній домінуючий окремий ефект. Це означає, що кожен фактор впливає на ефективність сепарації незалежно від значень інших факторів, що спрощує практичну оптимізацію параметрів.

Оптимізація параметрів за методом функції бажаності Харінгтона з використанням комплексного критерію, що враховує як ефективність сепарації (вага 0,6), так і продуктивність (вага 0,4), дозволила встановити раціональні значення конструктивно-технологічних параметрів:

- питома подача $q_b = 900...1000$ кг/(м·год);
- частота коливань $n = 450...480$ кол./хв;
- кут відхилення осей отворів $\beta = 9...10^\circ$.

При цих параметрах досягається максимальна ефективність сепарації $Y = 78...80\%$ при збереженні високої продуктивності та стабільності процесу.

Порівняння експериментального решета з кутом відхилення $\beta = 10^\circ$ з традиційним решетом ($\beta = 0^\circ$) при однакових режимах роботи показало наступні переваги запропонованої конструкції:

- підвищення ефективності сепарації на 12...15% (з 68% до 78...80%);
- збільшення питомої продуктивності на 15...18% при збереженні якості очищення;
- зменшення забивання отворів на 20...25% за рахунок направляючої дії нахилених отворів;
- зниження травмування зерна на 8...10% через зменшення інтенсивності механічного впливу.

Додатково проведено оцінку енергоефективності процесу сепарації. Встановлено, що питомі енергозатрати на сепарацію 1 тони зерна на експериментальному решеті становлять 0,42...0,45 кВт·год/т проти 0,51...0,54 кВт·год/т для традиційного решета, що свідчить про зниження енергоспоживання на 16...18%.

Висновки. 1. Розроблено математичну модель руху непрохідної частки вздовж отвору похилого решета із зигзагоподібним розташуванням отворів, яка вперше враховує не лише сили тяжіння, тертя та нормальної реакції, але й силу опору шару зернового матеріалу, пропорційну швидкості руху частки. Отримано аналітичний розв'язок диференційного рівняння у вигляді залежності $v^2 = v_0^2 + 2(A/B)x$, що встановлює функціональну залежність швидкості переміщення частки від координати, кута нахилу решета α та кута відхилення отворів β від поздовжньої осі. Модель дозволяє прогнозувати кінематичні характеристики руху зернової маси та є теоретичною основою для оптимізації конструкції решітних сепараторів.

2. Встановлено, що збільшення кута нахилу решета α суттєво підвищує швидкість руху часток та інтенсивність сепарації через збільшення складової сили тяжіння, що діє вздовж поверхні, тоді як збільшення кута відхилення отворів β зменшує швидкість переміщення зернової маси, що є позитивним фактором. При $\alpha = 6...8^\circ$ збільшення β від 0° до 10° призводить до зменшення швидкості на 5...10%, що підтверджує необхідність оптимізації геометричних параметрів розташування отворів для забезпечення балансу між інтенсивністю переміщення та часом контакту часток з отворами. Визначено критичну умову забезпечення стабільного переміщення зернової маси.

3. Експериментально підтверджено гіпотезу про ефективність використання зигзагоподібного розташування отворів решета на лабораторному сепараторі Petkus Wutha K 294 A з обробкою зернового вороху озимої пшениці. Збільшення кута відхилення від 0° до 10° підвищує повноту виділення домішок на 8...16% залежно від режимів роботи обладнання. Встановлено, що найбільший вплив на ефективність сепарації мають питома подача та кут відхилення осей отворів, тоді як вплив частоти коливань є менш значущим. Отримано адекватну регресійну модель другого порядку ($R^2 = 0,94$), що описує залежність ефективності сепарації від досліджуваних факторів.

4. Встановлено раціональні значення конструктивно-технологічних параметрів решіт із зигзагоподібним розташуванням отворів за методом функції бажаності Харінгтона: питома подача $q_b = 900...1000$ кг/(м·год), частота коливань $n = 450...480$ кол./хв, кут відхилення осей отворів $\beta = 9...10^\circ$. При цих параметрах досягається максимальна ефективність сепарації $Y = 78...80\%$ при збереженні високої продуктивності. Порівняння з традиційним решетом показало підвищення ефективності на 12...15%, збільшення питомої продуктивності на 15...18%, зменшення забивання отворів на 20...25% та зниження енергоспоживання на 16...18%.

Список літератури

- 1 *Машини, агрегати та комплекси для післязбиральної обробки і зберігання врожаю* (за ред. Халіна С. В., Лебедева С. А.) / [Колектив авторів]; Міністерство аграрної політики та продовольства України; УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого. – Дослідницьке, 2023. – 323 с. – (Серія «Сільськогосподарська техніка XXI: моніторинг, випробування, прогнозування»).
- 2 Алієв Е. Б., Лупко К. О. Методика симуляції процесу сепарації насінневого матеріалу дрібнонасінневих культур на циліндричному чарунковому трієрі. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 1 (108). С. 36-44. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2023-1-4>.
- 3 ДСТУ 3768:2019. *Пшениця. Технічні умови*. К.: УкрНДНЦ, 2019. 14 с.
- 4 Бажан І.М., Васильковський О.М., Лещенко С.М., Амосов В.В. Інтенсифікація процесу сепарації зерна на плоскому коливальному решеті із зигзаговидним розташуванням отворів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник*. Вип. 54. 2024. С. 192-202. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.192-202>.
- 5 Завгородній О. І. Наукові основи процесів очищення отворів решіт зерноочисних машин: автореф. дис. на здобуття ступеня д-ра техн. наук: спец. 05.05.11, Харків, 2001. 20 с.
- 6 Бажан І.М. Результати експериментального дослідження сепарації зерна на плоскому коливальному решеті із зигзаговидним розташуванням отворів. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 12(43), ч. 1. 2025. С. 164-174. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.164-174](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.164-174).
- 7 Бажан І.М. Аналіз руху частки по решету з загзаговидно розташованими отворами. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія механізація та автоматизація виробничих процесів*. Вип. 4 (62), 2025. С. 8-13. <https://doi.org/10.32782/msnau.2025.4.2>.
- 8 Тіщенко Л. М. Наукові основи процесів вібровідцентрового сепарування зернових сумішей : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.11. Харків, 2004. 403 с.
- 9 Котов Б. І., Степаненко С. П., Пастушенко М. Г. Тенденції розвитку конструкцій машин та обладнання для очищення і сортування зерно матеріалів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: загальнодерж. міжвід. наук.-техн. зб.* 2003. Вип. 33. С.53-59.
- 10 Ольшанський В. П. Про рух неоднорідної дрібнозернистої суміші по плоскому віброрешету. *Інженерія переробних і харчових виробництв*. 2017. № 2 (1). С. 17-22.
- 11 Bracasescu C., Gageanu I., Popescu S., Selvi K.C. Researches concerning impurities separation process from mass of cereal seeds using vibrating sieves in air flow currents. *Engineering for Rural Development*. Jelgava, 2016. P. 364–370.
- 12 Богомолів О.В. Аналіз конструкцій сепараторів для сепарації важкороздільних зернових сумішей. *Інженерія переробних і харчових виробництв*. 2017. № 1. С. 47-51.
- 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(10). 4383. <https://doi.org/10.3390/app11104383>.
- 14 Kharchenko S. Modeling the dynamics of the grain mixtures with the screening on cylindrical vibrating sieve separators. *ТЕКА. Commission of motorization and energetics in agriculture*. 2015. Vol. 15, No. 3. P. 87-93.
- 15 Chen Y.H., Tong X. Application of the DEM to screening process: a 3D simulation. *Min Sci Technol*. 2009. Vol. 19, No. 4. P. 493-497. [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60092-2](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60092-2).
- 16 Chen Y.H., Tong X. Modeling screening efficiency with vibrational parameters based on DEM 3D simulation. *Min Sci Technol*. 2010. Vol. 20, No. 4. P. 615-620. [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60254-4](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60254-4).
- 17 Cleary P.W. Large scale industrial DEM modeling. *Eng Comput*. 2004. Vol. 21. P. 169-204. <https://doi.org/10.1108/02644400410519730>.
- 18 Cleary P.W. Prediction of coupled particle and fluid flows using DEM and SPH. *Miner Eng*. 2015. Vol. 73. P. 85-99. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.09.005>.
- 19 Wang G., Tong X. Screening efficiency and screen length of a linear vibrating screen using DEM 3D simulation. *Min Sci Technol*. 2011. Vol. 21, No. 3. P. 451-455. <https://doi.org/10.1016/j.mstc.2011.05.026>.
- 20 Котов Б. І., Степаненко С. П., Калініченко Р. А. Теоретичне обґрунтування руху частинки зерна на вібропневморешеті при дії розпушуючих робочих органів. *Науковий вісник Національного аграрного університету*. 2007. Вип. 115. С. 112–117.
- 21 Степаненко С.П. Аналіз взаємодії пасивного розпушувача із віброзрідженим зерновим шаром. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільськогосподарства України*. Дослідницьке. 2005. Вип. 8(22). Кн. 2. С. 290-297.
- 22 Степаненко С. П., Котов Б. І., Попадюк І. С. Дослідження процесу пневмовібраційного поділу зерна за густиною під час одномірного переміщення зернового потоку *Механізація та електрифікація сільськогосподарства: [Загальнодержавний збірник]*. 2021. Вип. №14 (113). / [ННЦ“ІМЕСГ”]. Глеваха, 2021. С. 77–87. DOI:10.37204/0131-2189-2021-14-8.
- 23 Васильковський О. М. Розробка конструкції та обґрунтування параметрів відцентрового решітного сепаратора зерна: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Кіровоград, 2001. 18 с.

- 24 Васильковський О. М., Лещенко С. М., Мороз С. М., Нестеренко О. В. До створення концепції «ідеального» решета зернового сепаратора. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник*. Вип. 50. 2020. С. 52-58. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.52-58>.
- 25 Lawinska K., Wodzinski P., Modrzewski R. A method for determining sieve holes blocking degree. *Physicochem. Probl. Miner. Process.* 2015. Vol. 51, No. 1. P. 15-22.
- 26 Lawinska K., Wodzinski P., Modrzewski R. Mathematical and empirical description of screen blocking. *Granul. Matter.* 2016. Vol. 18, No. 1. P. 1-10. DOI:10.1007/s10035-016-0622-4.
- 27 *Спосіб підвищення ефективності сепарації сипких матеріалів на решетах*: пат. 158059 Україна: МПК В07В 13/04 (2006.01). № u 2024 02571. М. В. Бакум, О. Б. Козій, В. Г. Маруськов, А. Д. Михайлов, М. М. Майборода, М. М. Крекот, О. В. Сіяєва; власник Держ. біотехн. ун-т.; заявл. 14.05.2024; опубл. 25.12.2024, Бюл.№ 52. 4 с.
- 28 Методи визначення показників надійності рифлених перфорованих просіювальних поверхонь / С. О. Харченко, О. І. Біловод, Ф. М. Харченко [та ін.] // *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки : наук. зб. – Кропивницький : ЦНТУ, 2025. – Вип. 12(43), ч. 1. – С. 265-271.* [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.265-271](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.265-271).
- 29 Патент на корисну модель № 154304 Україна, МПК В07В 1/00. Плоске решето / Олексієнко Д. С., Бажан І. М., Лещенко С. М., Васильковський О. М., Петренко Д. І., Мороз С. М.; заявник та власник Центральноукраїнський національний технічний університет. – № u202302258; заявл. 12.05.2023; опубл. 01.11.2023, Бюл. № 44. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1769156/>.
- 30 Кравчук, В. І. та ін. *Машини для збирання та первинної переробки сільськогосподарських культур*. Дослідницьке: УкрНДІПВТ ім. Л. Погоорілого. 2010. 280 с.

References

1. Khalin, S. V., & Lebediev, S. A. (Eds.). (2023). *Mashyny, ahrehaty ta komplekxy dlia pisliazbyralnoi obrobky i zberihannia vrozhaiu* [Machines, units and complexes for post-harvest processing and storage of crops]. UkrNDIPVT im. L. Pohoriloho. [in Ukrainian].
2. Aliev, E. B., & Lupko, K. O. (2023). *Metodyka symuliatcii protsesu separatsii nasinnievoho materialu dribnonasinnievych kultur na tsylindrychnomu charunkovomu trieri* [Methodology for simulating the process of separation of seed material of small-seeded crops on a cylindrical indented cylinder]. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiakh* [Vibrations in Engineering and Technology], (1), 36–44. <https://doi.org/10.37128/2306-8744-2023-1-4>. [in Ukrainian].
3. DSTU 3768:2019. (2019). *Pshenytsia. Tekhnichni umovy* [Wheat. Specifications]. UkrNDNTS. [in Ukrainian].
4. Bazhan, I. M., Vasylykivskiy, O. M., Leshchenko, S. M., & Amosov, V. V. (2024). *Intensyfikatsiia protsesu separatsii zerna na ploskomu kolyvalnomu resheti iz zyhzhovydnym roztashuvanniam otvoriv* [Intensification of the process of grain separation on a flat vibrating sieve with a zigzag arrangement of holes]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta ekspluatatsiia silskohospodarskykh mashyn* [Design, production and operation of agricultural machines], (54), 192–202. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.192-202>. [in Ukrainian].
5. Zavorodnii, O. I. (2001). *Naukovi osnovy protsesiv ochyshchennia otvoriv reshit zernoochysnykh mashyn* [Scientific basis of the processes of cleaning the holes of sieves of grain cleaning machines] [Author's abstract of Doctoral dissertation, Kharkiv State Technical University of Agriculture]. [in Ukrainian].
6. Bazhan, I. M. (2025). *Rezultaty eksperymentalnoho doslidzhennia separatsii zerna na ploskomu kolyvalnomu resheti iz zyhzhovydnym roztashuvanniam otvoriv* [Results of experimental research on grain separation on a flat vibrating sieve with a zigzag arrangement of holes]. *Tsentralkoukrainskyi naukovyi visnyk. Tekhnichni nauky* [Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences], 12(43), 164–174. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.164-174](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.164-174). [in Ukrainian].
7. Bazhan, I. M. (2025). *Analiz rukhu chastyky po resheti z zahzhovydno roztashovanyimi otvoramy* [Analysis of particle movement on a sieve with zigzag-arranged holes]. *Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarynoho universytetu. Seriya mekhanizatsiia ta avtomatyzatsiia vyrobnychych protsesiv* [Herald of Sumy National Agrarian University. Series: Mechanization and Automation of Production Processes], (4), 8–13. <https://doi.org/10.32782/msnau.2025.4.2>. [in Ukrainian].
8. Tishchenko, L. M. (2004). *Naukovi osnovy protsesiv vibrovidtsentrovoho separuvannia zernovykh sumishei* [Scientific basis of the processes of vibro-centrifugal separation of grain mixtures] [Doctoral dissertation, Kharkiv State Technical University of Agriculture]. [in Ukrainian].
9. Kotov, B. I., Stepanenko, S. P., & Pastushenko, M. H. (2003). *Tendentsii rozvytku konstruktzii mashyn ta obladnannia dlia ochyshchennia i sortuvannia zerno materialiv* [Trends in the development of designs of machines and equipment for cleaning and sorting grain materials]. *Konstruiuvannia, vyrobnytstvo ta*

- eksploatatsiia silskohospodarskykh mashyn* [Design, production and operation of agricultural machines], (33), 53–59. [in Ukrainian].
10. Olshanskyi, V. P. (2017). Pro rukh neodnorodnoi dribnozernystoi sumishi po ploskomu vibroreshetu [On the movement of a non-homogeneous fine-grained mixture on a flat vibrating sieve]. *Inzheneriia pererobnykh i kharchovykh vyrobnytstv* [Engineering of Processing and Food Productions], (2), 17–22. [in Ukrainian].
 11. Bracacescu, C., Gageanu, I., Popescu, S., & Selvi, K. C. (2016). Researches concerning impurities separation process from mass of cereal seeds using vibrating sieves in air flow currents. *Engineering for Rural Development*, 364–370. [in English].
 12. Bohomolov, O. V. (2017). Analiz konstruktsii separatoriv dlia separatsii vazhkorozdilnykh zernovykh sumishei [Analysis of separator designs for separation of difficult-to-separate grain mixtures]. *Inzheneriia pererobnykh i kharchovykh vyrobnytstv*, (1), 47–51. [in Ukrainian].
 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 vertical pneumatic separation duct. *Applied Sciences*, 11(10), 4383. <https://doi.org/10.3390/app11104383>. [in English].
 14. Kharchenko, S. (2015). Modeling the dynamics of the grain mixtures with the screening on cylindrical vibrating sieve separators. TEKA. *Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*, 15(3), 87–93. [in English].
 15. Chen, Y. H., & Tong, X. (2009). Application of the DEM to screening process: A 3D simulation. *Mining Science and Technology (China)*, 19(4), 493–497. [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60092-2](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60092-2). [in English].
 16. Chen, Y. H., & Tong, X. (2010). Modeling screening efficiency with vibrational parameters based on DEM 3D simulation. *Mining Science and Technology (China)*, 20(4), 615–620. [https://doi.org/10.1016/S1674-5264\(09\)60254-4](https://doi.org/10.1016/S1674-5264(09)60254-4). [in English].
 17. Cleary, P. W. (2004). Large scale industrial DEM modeling. *Engineering Computations*, 21(2/3/4), 169–204. <https://doi.org/10.1108/02644400410519730>. [in English].
 18. Cleary, P. W. (2015). Prediction of coupled particle and fluid flows using DEM and SPH. *Minerals Engineering*, 73, 85–99. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.09.005>. [in English].
 19. Wang, G., & Tong, X. (2011). Screening efficiency and screen length of a linear vibrating screen using DEM 3D simulation. *Mining Science and Technology (China)*, 21(3), 451–455. <https://doi.org/10.1016/j.mstc.2011.05.026>. [in English].
 20. Kotov, B. I., Stepanenko, S. P., & Kalinichenko, R. A. (2007). Teoretychne obruntuvannya rukhu chastynky zerna na vibropnevmoresheti pry dii rozpushuiuchykh robochykh orhaniv [Theoretical substantiation of grain particle movement on a vibro-pneumatic sieve under the action of loosening working bodies]. *Naukovyi visnyk Natsionalnoho ahrarynoho universytetu*, (115), 112–117. [in Ukrainian].
 21. Stepanenko, S. P. (2005). Analiz vzayemodiyi pasyvnogo rozpushuvacha iz vibrozridzhenym zernovym sharom [Analysis of the interaction of a passive loosener with a vibro-fluidized grain layer]. *Tekhniko-tehnologichni aspekty rozvytku ta vyprobuvannya novoyi tekhniki i tekhnolohiy dlya silskoho hospodarstva Ukrayiny*, 8(22), 290–297. [in Ukrainian].
 22. Stepanenko, S. P., Kotov, B. I., & Popadiuk, I. S. (2021). Doslidzhennia protsesu pnevmovibratsiynoho podilu zerna za hustynoiu pid chas odnomirnoho peremishchennia zernovoho potoku [Investigation of the process of pneumovibrational separation of grain by density during one-dimensional movement of the grain flow]. *Mekhanizatsiia ta elektryfikatsiia silskoho hospodarstva*, 14(113), 77–87. DOI:10.37204/0131-2189-2021-14-8. [in Ukrainian].
 23. Vasylykivskiy, O. M. (2001). *Rozrobka konstruktsii ta obruntuvannya parametriv vidtsentrovoho reshitnoho separatora zerna* [Development of the design and substantiation of the parameters of the centrifugal sieve grain separator] (Unpublished doctoral dissertation summary). Kirovohrad National Technical University, Kirovohrad, Ukraine.
 24. Vasylykovskiy, O. M., Leshchenko, S. M., Moroz, S. M., & Nesterenko, O. V. (2020). Do stvorennia kontseptsii “idealnoho” resheta zernovoho separatora [On the creation of the concept of an "ideal" sieve of a grain separator]. *Konstruiuvannya, vyrobnytstvo ta eksploatatsiia silskohospodarskykh mashyn*, (50), 52–58. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2020.50.52-58>. [in Ukrainian].
 25. Lawinska, K., Wodzinski, P., & Modrzewski, R. (2015). A method for determining sieve holes blocking degree. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 51(1), 15–22. [in English].
 26. Lawinska, K., Wodzinski, P., & Modrzewski, R. (2016). Mathematical and empirical description of screen blocking. *Granular Matter*, 18(1), 1–10. DOI:10.1007/s10035-016-0622-4.
 27. Bakum, M. V., Kozii, O. B., Maruskov, V. H., Mykhailov, A. D., Maiboroda, M. M., Krekot, M. M., & Siniaieva, O. V. (2024). *Sposib pidvyshchennia efektyvnosti separatsii sypykh materialiv na reshetakh* [Method for increasing the efficiency of separation of bulk materials on sieves] (Ukrainian Patent No. 158059). State Biotechnical University. [in Ukrainian].

28. Kharchenko, S. O., Bilovod, O. I., Kharchenko, F. M., et al. (2025). Metody vyznachennia pokaznykiv nadiinosti ryfnykh perforovanykh prosiuvalnykh poverkhon [Methods for determining reliability indicators of corrugated perforated screening surfaces]. *Tsentralkoukrainskyi naukovi visnyk. Tekhnichni nauky*, 12(43/1), 265–271. [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).1.265-271](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.265-271). [in Ukrainian].
29. Oleksienko, D. S., Bazhan, I. M., Leshchenko, S. M., Vasylykovskiy, O. M., Petrenko, D. I., & Moroz, S. M. (2023). Ploske resheto [Flat sieve] (Ukrainian Patent No. 154304). Central Ukrainian National Technical University. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1769156/>. [in Ukrainian].
30. Kravchuk, V. I. ta in. (2010). Mashyny dlia zbyrannia ta pervynnoi pererobky silskohospodarskykh kultur [Machines for harvesting and primary processing of agricultural crops]. *Doslidnytske: UkrNDIPVT im. L. Pohoriloho*, 280 p. (in Ukrainian)

Ihor Bazhan, Serhii Leshchenko, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksii Vasylykovsky**, Prof., PhD tech. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Performance Evaluation of Grain Cleaning Machine Sieves With a Zigzag Hole Arrangement

The study aims to enhance the efficiency of preliminary and primary cleaning of grain heaps through a scientifically substantiated selection of design parameters for flat oscillating sieves with a zigzag (staggered) hole arrangement. The necessity of this work is driven by the discrepancy between the capabilities of traditional screening equipment and the requirements of the current DSTU 3768:2019 standard, which regulates the maximum impurity content in commercial grain. Furthermore, there is a lack of scientifically verified recommendations regarding the rational operational parameters of sieves with inclined holes in both domestic and foreign technical literature.

The study develops a mathematical model of the dynamics of a non-passing particle moving along an inclined rectangular sieve hole. Unlike existing approaches, the proposed model simultaneously accounts for four components: gravity, sliding friction, normal reaction of the supporting surface, and the resistance force of the grain layer, which is proportional to the instantaneous velocity of the particle. The solution to the differential equation of motion is obtained in analytical form – as a functional dependence of the squared velocity on the displacement coordinate, the sieve inclination angle α , and the hole axis deviation angle β from the longitudinal axis. A critical condition ensuring stable movement of the grain mass without stalling on the surface has been established. The experimental part of the work was conducted on a Petkus Wutha K 294A laboratory separator using a winter wheat heap (Podolianka variety) with a natural moisture content of 14–15%, obtained after direct combining. A second-order central composite design (CCD) of the 2^3 type was implemented, varying three factors: specific feed rate (600–1200 kg/(m·h)), oscillation frequency (350–550 strokes/min), and hole axis deviation angle (0–10°). The total number of experimental points was 48. Based on statistical processing in the STATISTICA 12 environment, a second-order regression model was obtained with a coefficient of determination $R^2=0.94$, its adequacy confirmed by the Fisher criterion ($F_{\text{calc}}=2.34 < F_{\text{tab}}=3.29$). Using the Harrington desirability function with a complex optimality criterion, the rational combination of design and technological parameters was determined: specific feed rate – 900–1000 kg/(m·h), oscillation frequency – 450–480 strokes/min, and hole axis deviation angle – 9–10°.

Comparative tests proved that implementing sieves with a zigzag hole arrangement at a deviation angle of $\beta = 10^\circ$ provides significant technological and energy advantages over traditional designs ($\beta = 0^\circ$): separation efficiency increases by 12–15% (from 68% to 78–80%); specific productivity rises by 15–18% without increasing the machine's overall dimensions; the orifice clogging rate (blinding intensity) is reduced by 20–25% due to the guiding effect of the inclined channels; and the specific energy consumption for separating one ton of grain is reduced by 16–18% – from 0.51–0.54 to 0.42–0.45 kWh/t. The results obtained form the theoretical foundation and practical basis for designing new and modernizing existing screening units of general-purpose grain cleaning machines.

grain cleaning machines, Sieve separation, zigzag (staggered) holes, cleaning efficiency, specific productivity, mathematical model, factorial experiment, optimization of parameters

Одержано (Received) 27.02.2026

Прорецензовано (Reviewed) 10.03.2026

Прийнято до друку (Approved) 12.03.2026