

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
«ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БАЖАН ІГОР МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 631.362

ДИСЕРТАЦІЯ

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПЛОСКОГО КОЛИВАЛЬНОГО
РЕШЕТА

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування

Галузь знань 13 Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело _____ І.М. Бажан

Науковий керівник **Лещенко Сергій Миколайович** кандидат технічних наук, доцент
Центральноукраїнський національний технічний університет

Кропивницький 2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
«ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БАЖАН ІГОР МИКОЛАЙОВИЧ

УДК 631.362

ДИСЕРТАЦІЯ

ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПЛОСКОГО КОЛИВАЛЬНОГО
РЕШЕТА

Спеціальність 133 – Галузеве машинобудування

Галузь знань 13 Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело _____ І.М. Бажан

Науковий керівник **Лещенко Сергій Миколайович** кандидат технічних наук, доцент

Центральноукраїнський національний технічний університет

Кропивницький 2026

АНОТАЦІЯ

Бажан І.М. Обґрунтування параметрів плоского коливального решета. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 133 – «Галузеве машинобудування». – Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2026.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню технологічної ефективності решітної сепарації зернового вороху шляхом удосконалення геометрії робочої поверхні плоского коливального решета та обґрунтування його раціональних конструктивних і технологічних параметрів.

Якісна післязбиральна обробка зерна є головною умовою збереження врожаю і виконання вимог стандартів до продукції рослинництва. В Україні щорічно збирається 60...80 млн т зернових, а вміст домішок у свіжозібраному воросі може сягати 10...15 %, що унеможлиблює його тривале зберігання та реалізацію без попереднього очищення. Діючі технічні умови ДСТУ 3768:2019 регламентують вміст сміттєвих домішок у пшениці 1–2 класу на рівні не більше 1...2 %, тож вимоги до якості очищення є достатньо жорсткими. Решітна сепарація залишається найбільш поширеним методом попереднього і первинного очищення зібраного врожаю зернових завдяки найбільш ефективному способу розділення компонентів зерноsumіші за геометричними розмірами насіння, конструктивній простоті та відносно невисоким питомим енерговитратам.

Поряд із цим детальний аналіз найпоширеніших серійних плоских коливальних решіт виявив їх принциповий конструктивний недолік – паралельне розміщення поздовжніх осей отворів відносно напрямку переміщення зернової матеріалу, що призводить до утворення так званих «мертвих зон» над поздовжніми перетинками решета. Частки, центр ваги яких потрапляє у проекцію перетинки, теоретично можуть переміщуватися по ній на всій довжині решета без просіювання. Теоретично досяжна ймовірність потрапляння прохідних часток у площину отворів класичних решіт складає

лише 50...60 %. Відомі способи інтенсифікації решітного очищення – підвищення частоти коливань, застосування активаторів, комбінованих кінематичних схем, профільованих і струнних поверхонь – або ускладнюють конструкцію, або не забезпечують достатнього ефекту при прийнятних витратах. Саме зазначені проблеми визначили мету і актуальність подальшого наукового дослідження.

Метою роботи є теоретичне обґрунтування та експериментальне підтвердження закономірностей процесу решітної сепарації зернового матеріалу на плоскому коливальному решеті із зигзагоподібним розміщенням продовгуватих отворів, а також встановлення раціональних конструктивних параметрів і технологічних режимів його роботи.

Об'єктом досліджень є процес решітної сепарації зернових матеріалів на плоскому коливальному решеті із зигзагоподібним розміщенням продовгуватих отворів у складі зерноочисної машини загального призначення.

Предметом досліджень є закономірності впливу кута відхилення осей отворів від поздовжньої осі решета, питомої подачі матеріалу та частоти коливань на ефективність очищення зернового вороху.

В роботі систематизовано способи очищення зернових культур та встановлено, що решітна сепарація є технологічно незамінною, але її ефективність у серійних зерноочисних агрегатах значно обмежена через нераціональну геометрію робочих отворів. Проведений аналіз існуючих конструктивних рішень та відомих напрямів інтенсифікації процесу сепарації підтвердив перспективність вдосконалення геометрії решітного полотна без принципових змін кінематики приводу і самої конструкції зерноочисних машин. Сформульовано робочу гіпотезу про ефективність зигзагоподібного розміщення отворів і визначено перелік завдань для теоретичних та експериментальних досліджень.

Під час досліджень проведено аналітичне обґрунтування запропонованого конструктивного рішення. На основі геометричного аналізу встановлено, що повна поперечна проекція отвору, повернутого на кут β

відносно поздовжньої осі решета, становить $b_0 \cdot \cos\beta + l \cdot \sin\beta$, де l – довжина, b_0 – ширина отвору. Визначено теоретичний критичний кут відхилення $\beta_{кр} \geq 4,6^\circ$ (при $l = 25$ мм), досягнення якого забезпечує повне перекриття проєкцій суміжних отворів і повне зникнення «мертвих зон», що гарантує ймовірність потрапляння прохідної частки у зону отвору на рівні 100 % незалежно від поперечного положення частки на решеті. Побудовано аналітичну модель руху зернової частки на коливальному решеті, яка враховує кінематику плоскопаралельного руху решітного стану, силу тяжіння, нормальну реакцію опори та силу тертя ковзання. Отримано аналітичні вирази для поздовжньої і поперечної складових абсолютної швидкості частки; показано, що поперечна компонента переміщення зростає пропорційно функції $\sin\beta$. Встановлено також, що зигзагоподібне розміщення отворів не змінює «живий» переріз решітного полотна порівняно з класичним варіантом при тій самій кількості отворів, тобто результат підвищення ефективності сепарації досягається виключно завдяки геометричному перерозподілу просторового орієнтування прохідних часток.

Третій розділ роботи включає програму та методику експериментальних досліджень. Дослідження проводились на базі лабораторного сепаратора Petkus Wutha K 294A. Виготовлено дослідні зразки решітних полотен з кутами $\beta = 0^\circ; 3^\circ; 5^\circ; 10^\circ; 11^\circ$. За результатами однофакторних пошукових дослідів визначено три основних чинники впливу: питома подача зернового матеріалу q_b (кг/(дм·год)), частота коливань решітного стану n (коливань/хв) і кут відхилення осей отворів β (град.). Для встановлення кількісних закономірностей застосовано центральний композиційний план другого порядку (ЦКП 2^3) з 20 дослідями і трикратним повторенням кожної точки; достовірність, відтворюваність і адекватність результатів перевірено за критеріями Кохрена, Фішера та Стьюдента.

За даними реалізованого ЦКП отримано регресійні математичні моделі другого порядку, що адекватно описують залежність ефективності сепарації η від досліджуваних факторів. Аналіз поверхонь відгуку та оптимізація за

методом функції бажаності Харрінгтона дозволили встановити раціональні параметри роботи вдосконаленого решета: питома подача $q_b = 850 \dots 1050$ кг/(дм·год), частота коливань $n = 440 \dots 490$ кол/хв, кут відхилення $\beta = 10^\circ$. Збіжність теоретично спрогнозованих і експериментально встановлених оптимальних значень β не перевищує 8 %, що підтверджує адекватність аналітичної моделі. Порівняльні випробування на агрегаті ЗВС-20А довели, що вдосконалене решето ($\beta = 10^\circ$) порівняно з серійним ($\beta = 0^\circ$) забезпечує підвищення ефективності сепарації на 24,7 % – з 54,7 до 68,2 %, зниження загального вмісту домішок у очищеному зерні на 30% – з 4,4 до 3,1 % і зростання граничної питомої продуктивності решітної частини на 8...12 % при рівних значеннях повноти розділення. Стабільність переваг вдосконаленого решета підтверджено у дослідженому діапазоні вологості зернового матеріалу 13,5...16,2 %.

Під час оцінки прогнозованої технологічної та економічної ефективності запропонованого технічного рішення підтверджено, що вдосконалене решето забезпечує відповідність вимогам ДСТУ 3768:2019 для зерна пшениці 1 класу (вміст смітних домішок у очищеному зерні 0,9 %), тоді як серійне решето за типових режимів роботи забезпечує 2 клас. Прогнозований річний економічний ефект для господарства площею 100 га пшениці складає 138000 грн на рік, при цьому строк окупності капіталовкладень на рівні 15000...20000 грн становить 3...4 місяці виробничої кампанії. Головним джерелом ефекту є цінова надбавка за підвищення класності зерна. Впровадження не потребує змін у конструкції зерноочисного агрегату – лише модифікації штампувального оснащення.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному: вперше встановлено аналітичну залежність ймовірності потрапляння прохідної частки у площину отвору від кута відхилення β та геометричних параметрів решета і визначено критичний кут $\beta_{кр} \geq 4,6^\circ$, при якому повністю виключаються «мертві зони» над поздовжніми перетинками; вперше побудовано аналітичну модель руху зернової частки на коливальному решеті із зигзагоподібним розміщенням отворів з урахуванням поперечної складової переміщення; отримано регресійні

моделі другого порядку і встановлено раціональні параметри вдосконаленого решета методом функції бажаності Харрінгтона; дістали подальшого розвитку методичні підходи до порівняльної оцінки ефективності решітних поверхонь зерноочисних машин.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробці конкретних рекомендацій щодо конструктивних параметрів решітного полотна із зигзагоподібним розміщенням отворів ($\beta = 10^\circ$) та раціональних режимів роботи ($q_b = 850 \dots 1050$ кг/(м·год), $n = 440 \dots 490$ кол/хв), що є повністю адаптованим до впровадження у серійні зерноочисні машини, зокрема машини типу ЗВС-20А та аналогічні агрегати без будь-яких змін у їх конструкцію.

Ключові слова: зерновий ворох, сепарація зерна, решітне очищення, зигзагоподібне розміщення отворів, кут відхилення отворів, ефективність сепарації, зерноочисна машина, раціональні параметри, математична модель.

ABSTRACT

Bazhan I.M. Substantiation of the parameters of a flat vibrating sieve. Qualification thesis in the form of a manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Philosophy in the specialisation 133 – ‘Industrial Engineering’. – Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2026.

This thesis is devoted to improving the technological efficiency of sieve separation of grain by refining the geometry of the working surface of a flat vibrating sieve and justifying its rational design and technological parameters.

High-quality post-harvest grain processing is a key prerequisite for preserving the harvest and meeting the requirements of crop production standards. In Ukraine, 60–80 million tonnes of grain are harvested annually, and the impurity content in freshly harvested grain may reach 10–15%, which makes its long-term storage and sale impossible without prior cleaning. The current technical specifications of DSTU 3768:2019 regulate the content of foreign matter in Class 1–2 wheat at no more than 1–2%, so the requirements for cleaning quality are quite stringent. Screen separation

remains the most common method of pre-cleaning and primary cleaning of harvested grain crops due to its highly effective separation of grain mixture components based on seed size, its structural simplicity, and relatively low specific energy consumption.

At the same time, a detailed analysis of the most common series of flat vibrating screens has revealed a fundamental design flaw: the longitudinal axes of the apertures are parallel to the direction of grain movement, leading to the formation of so-called 'dead zones' above the longitudinal bars of the screen. Particles whose centre of gravity falls within the projection of a partition can, in theory, travel along it for the entire length of the screen without being sieved out. The theoretically achievable probability of passable particles entering the aperture plane of conventional screens is only 50–60%. Known methods for intensifying sieve cleaning – increasing the vibration frequency, using activators, combined kinematic schemes, profiled and string surfaces – either complicate the design or fail to provide a sufficient effect at acceptable costs. It is precisely these problems that have determined the aim and relevance of further scientific research.

The purpose of this work is to provide a theoretical justification and experimental confirmation of the patterns governing the process of sieve separation of granular material on a flat vibrating sieve with zigzag-arranged elongated apertures, as well as to establish optimal design parameters and operating conditions for its operation.

The subject of this research is the process of sieve separation of grain materials on a flat vibrating sieve with zigzag-shaped elongated apertures, as part of a general-purpose grain cleaning machine.

The subject of the research is the patterns of influence of the angle of deviation of the hole axes from the longitudinal axis of the screen, the specific feed rate of the material, and the vibration frequency on the efficiency of grain cleaning.

The methods of cleaning grain crops are systematised in this work, and it is established that sieve separation is technologically indispensable, but its efficiency in standard grain cleaning units is significantly limited due to the irrational geometry of the working apertures. An analysis of existing design solutions and known

approaches to intensifying the separation process has confirmed the potential for improving the geometry of the sieve mesh without fundamental changes to the kinematics of the drive or the design of the grain cleaning machines themselves. A working hypothesis regarding the effectiveness of a zigzag arrangement of the apertures has been formulated, and a list of tasks for theoretical and experimental research has been defined.

During the research, an analytical justification of the proposed design solution was carried out. Based on geometric analysis, it was established that the total cross-sectional area of an opening rotated by an angle β relative to the longitudinal axis of the screen is given by $b_0 \cdot \cos\beta + l \cdot \sin\beta$, where l is the length and b_0 is the height of the opening. The theoretical critical deflection angle $\beta_{cr} \geq 4.6^\circ$ (for $l = 25$ mm) was determined, achieving which ensures complete overlap of the projections of adjacent apertures and the complete elimination of 'dead zones', guaranteeing a 100% probability of a passing particle entering the aperture zone regardless of the particle's transverse position on the screen. An analytical model of the motion of a grain particle on an oscillating screen has been constructed, which takes into account the kinematics of the plane-parallel motion of the screen, the force of gravity, the normal reaction of the support, and the sliding friction force. Analytical expressions have been derived for the longitudinal and transverse components of the particle's absolute speed; it has been shown that the transverse component of displacement increases proportionally to the function $\sin\beta$. It has also been established that a zigzag arrangement of the apertures does not alter the 'effective' cross-sectional area of the sieve cloth compared to the classical variant with the same number of apertures; that is, the improvement in separation efficiency is achieved solely through the geometric redistribution of the spatial orientation of the passing particles.

The third chapter of this thesis outlines the programme and methodology of the experimental studies. The experiments were conducted using a Petkus Wutha K 294A laboratory separator. Six test samples of sieve cloths were produced with angles of $\beta = 0^\circ; 3^\circ; 5^\circ; 10^\circ; 11^\circ$. Based on the results of single-factor exploratory experiments, three main influencing factors were identified: the specific feed rate of grain material

q_b (kg/(dm·h)), the vibration frequency of the sieve n (vibrations/min) and the angle of deviation of the hole axes β (degrees). To establish quantitative patterns, a second-order central composite design (CCD 2^3) was applied, comprising 20 experiments with three replicates for each point; the reliability, reproducibility and adequacy of the results were verified using the Cochran, Fisher and Student criteria.

Based on the data from the implemented CSP, second-order regression mathematical models were obtained, which adequately describe the dependence of separation efficiency η on the investigated factors. Analysis of response surfaces and optimisation using Harrington's desirability function enabled the establishment of optimal operating parameters for the improved sieve: specific feed rate $q_b=850\dots1050$ kg/(dm·h), vibration frequency $n = 440\dots490$ cycles/min, and angle of inclination $\beta = 10^\circ$.

The discrepancy between the theoretically predicted and experimentally determined optimal values of β does not exceed 8%, which confirms the adequacy of the analytical model. Comparative tests on the ZVS-20A unit demonstrated that the improved sieve ($\beta = 10^\circ$), compared to the standard one ($\beta = 0^\circ$), provides a 24.7% increase in separation efficiency – from 54.7% to 68.2%, a 30% reduction in the total impurity content in the cleaned grain – from 4.4% to 3.1% – and an 8–12% increase in the maximum specific productivity of the sieving section at equal separation efficiency values. The stability of the improved sieve's advantages has been confirmed within the investigated moisture content range of the grain material of 13.5–16.2%.

During the assessment of the projected technological and economic efficiency of the proposed technical solution, it was confirmed that the improved sieve meets the requirements of DSTU 3768:2019 for Class 1 wheat grain (content of impurities in cleaned grain 0.9%), whereas the standard sieve, under typical operating conditions, achieves Class 2. The projected annual economic benefit for a farm with 100 ha of wheat is 138,000 UAH per year, with a payback period for capital investment of 15,000–20,000 UAH amounting to 3–4 months of the production season. The main source of the benefit is the price premium for higher grain quality.

Implementation does not require changes to the design of the grain cleaning unit – only modifications to the stamping equipment.

The scientific novelty of the results obtained lies in the following: for the first time, an analytical relationship has been established between the probability of a passing particle entering the aperture plane and the deflection angle β , as well as the geometric parameters of the sieve; furthermore, a critical angle $\beta_{cr} \geq 4.6^\circ$ has been determined, at which ‘dead zones’ above the longitudinal partitions; for the first time, an analytical model of the motion of a grain particle on an oscillating sieve with a zigzag arrangement of apertures has been constructed, taking into account the transverse component of displacement; second-order regression models have been obtained and rational parameters for an improved sieve have been established using Harrington’s desirability function; methodological approaches to the comparative assessment of the efficiency of sieve surfaces in grain cleaning machines have been further developed.

The practical significance of the results consists in the development of specific recommendations regarding the design parameters of the sieve surface with a zigzag arrangement of holes ($\beta = 10^\circ$) and optimal operating conditions ($q_b = 850 \dots 1050 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{h})$, $n = 440 \dots 490 \text{ rpm}$), which are fully adaptable for implementation in mass-produced grain cleaning machines, in particular the ZVS-20A type and similar units, without any changes to their design.

Keywords: grain pile, grain separation, sieve cleaning, zigzag arrangement of apertures, aperture deflection angle, separation efficiency, grain cleaning machine, optimal parameters, mathematical model.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ У ЯКИХ ПРЕДСТАВЛЕНІ ОСНОВНІ НАУКОВІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ

У фахових виданнях.

1. **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. – Кропивницький: ЦНТУ. Вип. 54. 2024. С. 192-202. <https://doi.org/10.32515/2414-3820.2024.54.192-202>

(здобувачем запропоновано результати теоретичного аналізу шляхів підвищення ефективності роботи плоских коливальних решіт, висловлено припущення, що найбільш ефективною є активізація внутрішньосферних процесів у оброблюваному матеріалі, наведено нове технічне рішення – решето із зигзагоподібним розташуванням отворів та сформульовано висновки за результатами досліджень).

2. **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. I. 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)

3. **Бажан, І. М.** (2025). АНАЛІЗ РУХУ ЧАСТКИ ПО РЕШЕТУ З ЗИГЗАГОВИДНО РОЗТАШОВАНИМИ ОТВОРАМИ. Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів, (4), 8-13. <https://doi.org/10.32782/msnau.2025.4.2>

4. **І. М. Бажан, С. М. Лещенко, О. М. Васильковський.** Оцінка ефективності роботи решіт зерноочисних машин із зигзагоподібним розташуванням отворів. // Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. – 2026. – Вип. 13(44). – С. 151-166. – DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13\(44\).151-166](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2026.13(44).151-166)

(здобувачем запропоновано 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).

Праці, які засвідчують апробацію дисертації.

5. **Бажан І.**, Олексієнко Д., Васильковський О., Лещенко С. Аналіз конструкцій плоских решіт зерноочисних машин. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Досягнення та перспективи галузі виробництва, переробки і зберігання сільськогосподарської продукції». – Кропивницький: ЦНТУ, 2023. С. 57-59. URL: <http://www.kntu.kr.ua/doc/science/zahody/vikl/2023/2-tez.pdf>

6. **І. Бажан**, Д. Олексієнко, А. Мажаєв, С. Лещенко, О. Васильковський. Інтенсифікація роботи плоского решета зерноочисних машин загального призначення. Матеріали IV Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції «ІННОВАЦІЇ: теорія і практика». Кропивницький: Академія Прикладних наук. 2023. С. 40-42. URL: <https://apn.biz.ua/storage/web/files/d4a9e154ddead5e9497ca869f4efcdb0.pdf>

7. **Бажан І. М.**, Васильковський О.М., Лещенко С.М., Амосов В.В. Підвищення ефективності очищення зерна на решетах із зигзаговидним розташуванням отворів. Матеріали V Міжнародної науково-практичної Інтернет-конференції «ІННОВАЦІЇ: теорія і практика». Кропивницький: Академія Прикладних наук. 2024. С. 77-79. URL: <https://apn.biz.ua/edition>

8. **Бажан І. М.**, Васильковський О.М., Лещенко С.М. Вплив параметрів і режимів роботи решета зерноочисних машин загального призначення на якість очищення збіжжя. ЗБІРНИК ТЕЗ ДОПОВІДЕЙ ХХVI МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ «Сучасні проблеми землеробської механіки» (17–18 жовтня 2025 року) присвяченій 125-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка. С. 309-312. URL: <https://nubip.edu.ua/xkhvi->

[mizhnarodnoyi-naukovoyi-konferentsiyi-suchasni-problemy-zemlerobskoyi-mekhaniky-17-18](#)

9. **Бажан, І. М.**, Васильковський, О. М., Лещенко, С. М. Підвищення ефективності решітної сепарації зерна. // The 9th International scientific and practical conference “Modern science: trends, challenges, solutions” (April 9-11, 2026) Cognum Publishing House, Liverpool, United Kingdom. 2026. P. 113-120. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2026/04/MODERN-SCIENCE-TRENDS-CHALLENGES-SOLUTIONS-9-11.04.26.pdf>

Праці, що додатково відображають наукові результати дисертації.

10. Патент на корисну модель (Україна) № 154304; МПК (2023.01) A01F 12/00, B07B 13/02 (2006.01), B07B 1/00. Плоске решето. / Олексієнко Д.С., **Бажан І.М.**, Лещенко С.М., Васильковський О.М., Петренко Д.І., Мороз С.М. Власник: Центральноукраїнський національний технічний університет. – № u2023 02258, заявл. 12.05.2023; опубл. 01.11.2023, бюл. № 44/2023. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1769156/>

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ВСТУП. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЕРТАЦІЇ	18
РОЗДІЛ I. СУЧАСНИЙ АНАЛІЗ СПОСОБІВ ТА ЗАСОБІВ ОЧИЩЕННЯ ЗЕРНА НА РЕШЕТАХ	
1.1. Актуальність і задачі очищення зернового вороху	27
1.2. Класифікація способів і технічного забезпечення очищення зернових культур	29
1.2.1. Способи очищення зернових культур	29
1.2.2. Решітне очищення: фізичний принцип та місце в технологічному процесі	33
1.2.3. Конструктивні особливості серійних ЗОМ із решітними робочими органами	41
1.3. Способи і засоби інтенсифікації роботи решітного очищення зерна	49
1.3.1. Загальна класифікація методів інтенсифікації решітної сепарації	49
1.3.2. Оптимізація кінематичних режимів коливань: теоретичні засади та практичні результати	50
1.3.3. Пристрої-активатори та сегрегатори: конструкції та ефективність	53
1.3.4. Комбіновані та нетрадиційні кінематичні схеми	54
1.3.5. Вдосконалення геометрії робочої поверхні решіт	55
1.4. Аналіз досліджень в напрямку встановлення раціональних параметрів і режимів роботи решітного очищення	57
1.4.1. Дослідження ймовірнісних моделей просіювання	57
1.4.2. DEM-дослідження динаміки часток на решітній поверхні	58
1.4.3. Дослідження оптимізації конструктивних параметрів	59
1.4.4. Дослідження теоретичних основ взаємодії часток із поверхнею решіт	61
Висновки до першого розділу та задачі досліджень	63
РОЗДІЛ II. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПЛОСКОГО РЕШЕТА	
2.1. Аналіз ймовірності просіювання прохідних часток крізь отвори решета	67
2.2. Детермінований аналіз технологічного ефекту від руху матеріалу по решету із зигзаговидно розташованими отворами	74
2.3. Теоретичне дослідження переміщення зернової частки по	81

поверхні решета із зигзагоподібними отворами, що здійснює коливання	
2.3.1. Передумови та схема сил	81
2.3.2. Рівняння руху з урахуванням коливань решета	82
2.3.3. Вирішення однорідного рівняння	85
2.3.4. Частковий розв'язок відносно сталої A_0 правої частини рівняння	86
2.3.5. Частковий розв'язок відносно гармонійної правої частини рівняння	86
2.3.6. Загальний розв'язок рівняння руху частки по оригінальному коливальному решету	88
2.3.7. Залежність швидкості руху непрохідної частки від переміщення	89
Висновки до розділу II	95
РОЗДІЛ III. ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	
3.1. Мета, задачі та програма експериментальних досліджень	97
3.2. Об'єкт, предмет та умови проведення експериментальних досліджень	99
3.2.1. Лабораторна установка для дослідження решітного очищення	100
3.2.2. Дослідні зразки решітних полотен	104
3.2.3. Відбір зернового матеріалу для проведення експериментальних досліджень	106
3.2.4. Вимірювальна апаратура та допоміжне обладнання для проведення експериментів	109
3.3. Методика планування та проведення багатofакторного експерименту	110
3.3.1. Порядок вибору факторів та критерію оптимізації	110
3.3.2. Методологія центрального композиційного планування	113
3.3.3. Матриця планування експериментальних досліджень	115
3.3.4. Порядок проведення експериментальних досліджень та відбір проб	116
3.4. Методика статистичної обробки результатів експериментальних досліджень	117
3.5. Методика порівняльних досліджень	119
3.6. Методика оцінки похибок вимірювань	120
3.7. Методика встановлення збіжності результатів теоретичних та експериментальних досліджень	121

Висновки до розділу III.	121
РОЗДІЛ IV. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	123
4.1. Результати пошукових досліджень	124
4.2. Реалізація центрального композиційного плану другого порядку, статистична обробка даних, верифікація регресійної моделі і рівняння регресії	131
4.3. Аналіз графічних результатів статистичної математичної моделі	137
4.4. Визначення раціональних параметрів моделі за методом функції бажаності Харрінгтона	141
4.5. Аналіз профілів передбачених значень і функцій бажаності факторів за результатами обробки у системі STATISTICA 12	143
4.6. Вплив вологості та засміченості зернового матеріалу на ефективність роботи вдосконаленого решета	147
4.7. Порівняльні дослідження ефективності роботи серійного і оригінального решета на зерновому воросі різних культур	150
4.8. Порівняльні дослідження ефективності решітної частини серійного зерноочисного агрегату зі стандартним та вдосконаленим решетом	152
4.9. Перевірка збіжності результатів теоретичних і експериментальних досліджень	155
Висновки до розділу IV	156
РОЗДІЛ V. ПРОГНОЗОВАНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ	
5.1. Обґрунтування підходу до оцінки ефективності технічного рішення	159
5.2. Прогнозований технологічний ефект від впровадження вдосконаленого решета у виробництво	160
5.3. Прогнозований економічний ефект для споживачів сільськогосподарської техніки	161
5.4. Прогнозований ефект для виробників сільськогосподарської техніки	163
5.5. Аналіз строку окупності та показників ефективності інвестицій	164
5.6. Прогнозування ефекту за умови масового впровадження вдосконаленого решета у зерноочисній галузі	165
5.7. Порівняльний аналіз із відомими технічними рішеннями-	166

аналогами	
5.8. Оцінка ризиків та обмежень застосування	168
5.9. Оцінка технічної новизни результатів досліджень	169
Висновки до розділу V	170
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	171
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	175
ДОДАТКИ	192

ВСТУП

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ДИСЕРТАЦІЇ

Актуальність теми дослідження. Ефективність функціонування зерноочисного обладнання є одним із головних факторів, які формують якість та ринкову вартість вирощеного врожаю зернових на завершальному етапі їх виробництва. Щорічне виробництво зерна в Україні становить 60...80 млн т., однак вирощене збіжжя, яке надходить після збирання зернозбиральними комбайнами, вміщує до 10...15 % домішок різного походження, а їх кількість і стан залежить від культури, умов збирання та технічного стану зернозбиральної техніки. Без якісного післязбирального очищення зібране зерно не придатне до тривалого зберігання, переробки і реалізації за ринковою вартістю.

Чинний стандарт ДСТУ 3768:2019 регламентує вміст сміттевої домішки у пшениці 1 класу не більше 1 %, а 2 класу – до 2 %. Перехід між класами суттєво впливає на закупівельну ціну: різниця між 1-м і 2-м класом сягає 200–400 грн/т залежно від кон'юнктури ринку. Отже підвищення ефективності післязбирального очищення зерна є важливою агротехнічною, технологічною й економічною задачею.

Удосконаленню процесів післязбирального очищення зерна і конструкцій зерноочисних агрегатів та їх решітних робочих органів присвячені роботи ряду відомих науковців, серед яких Е.Б. Алієв, М.В. Бакум, В.В. Бредихін, М.І. Васильковський, О.М. Васильковський, О.І. Завгородній, П.М. Заїка, Б.І. Котов, С.М. Лещенко, П.Г. Лузан, Ю.О. Манчинський, С.М. Мороз, О.В. Нестеренко, В.П. Ольшанський, М.М. Петренко, М.В. Півень, С.П. Степаненко, Л.М. Тіщенко, С.О. Харченко та багато інших.

Решітна сепарація залишається основним методом первинного очищення зернових матеріалів завдяки прямому взаємозв'язку між геометричними розмірами насіння та його посівними і продовольчими кондиціями, відносній конструктивній простоті, надійності й прийнятним питомим енерговитратам. Водночас питома продуктивність і ефективність плоских коливальних решіт серійних зерноочисних агрегатів залишаються значно нижчими від теоретично

можливих. Системний аналіз відомих конструктивних рішень дозволяє підтвердити, що головним невикористаним резервом є вдосконалення геометрії самого решітного полотна, а не ускладнення механізму приводу чи застосування додаткових пристроїв.

Принциповим конструктивним недоліком серійних пробивних решіт є паралельне розташування поздовжніх осей отворів відносно напрямку переміщення зернового матеріалу. Це призводить до виникнення «мертвих зон» над поздовжніми перетинками, тобто ділянок поверхні, над якими прохідні частки переміщуються вздовж решета без потрапляння до зони дії отворів. Теоретично досяжна ймовірність просіювання за такої геометрії не перевищує 50...60 %, що є обмеженням ефективності роботи решітного очищення. Усунення виявленого недоліку без суттєвого ускладнення конструкції серійних зерноочисних агрегатів є актуальним науково-технічним завданням.

Перспективним напрямом вирішення зазначеної проблеми є застосування плоского решета із зигзагоподібним (почерговим знакозмінним) розміщенням продовгуватих отворів відносно поздовжньої осі. Такий підхід потенційно повинен активізувати поперечні переміщення часток у зерновому шарі, ліквідувати «мертві зони» та підвищити ефективність сепарації без будь-яких змін у кінематиці приводу і конструкції зерноочисного агрегату. Проте конструктивні параметри подібних решіт, математичні моделі руху часток на їх поверхні та раціональні технологічні режими роботи на момент початку даних досліджень залишалися науково не обґрунтованими. Це визначає актуальність і практичну значущість представленої роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, роботами, темами. Дисертаційна робота виконана на базі Центральноукраїнського національного технічного університету в рамках реалізації науково-дослідних робіт кафедри сільськогосподарського машинобудування за темою: 0110U002143 «Підвищення ефективності роботи завантажувально-сепаруючих органів зерноочисних машин». Тематика дослідження відповідає Цілям сталого розвитку України до 2030 року, Державній стратегії регіонального розвитку

України на 2021–2027 роки та Стратегії розвитку Кіровоградської області на 2021–2027 роки.

Об’єкт досліджень: процес решітної сепарації зернових матеріалів на плоскому коливальному решеті із зигзагоподібним розміщенням продовгуватих отворів у складі зерноочисної машини загального призначення.

Предмет досліджень: закономірності впливу кута відхилення осей отворів від поздовжньої осі решета, питомої подачі зернового матеріалу та частоти коливань решітного стану на ефективність очищення зернового вороху і продуктивність решітного очищення.

Методи дослідження: теоретичні дослідження процесу потрапляння часток у площину отворів решета та аналітичне моделювання руху зернової частки виконані із застосуванням методів теорії ймовірності, теоретичної механіки, аналітичної геометрії і диференційного числення. Для вивчення кількісних залежностей між конструктивними параметрами і показниками ефективності сепарації застосовано методологію планування багатофакторного експерименту – центральний композиційний план другого порядку (ЦКП 2^3 + зіркові точки). Статистичну обробку результатів досліджень здійснювали методами регресійного аналізу з верифікацією моделей за критеріями Кохрена, Стьюдента і Фішера; обчислення виконано у програмному комплексі STATISTICA 12. Раціональні параметри визначено методом функції бажаності Харрінгтона. Лабораторні дослідження проводились на сепараторі Petkus Wutha K 294A з регулюванням частоти коливань за допомогою частотного перетворювача HE200-T3S-2R2G. Польові порівняльні випробування проводились на зерноочисному агрегаті ЗВС-20А.

Метою роботи є теоретичне обґрунтування та експериментальне підтвердження закономірностей процесу решітної сепарації зернового матеріалу на плоскому коливальному решеті із зигзагоподібним розміщенням продовгуватих отворів, а також встановлення раціональних конструктивних параметрів і технологічних режимів його роботи, що забезпечують максимальну якість післязбирального очищення зернових культур.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні **завдання дослідження**:

- провести аналіз і систематизацію відомих способів та технічних засобів решітного очищення зернових матеріалів, виявити принципові обмеження ефективності серійних конструкцій і обґрунтувати доцільність використання решіт із зигзагоподібним розміщенням отворів на його робочій поверхні;
- створити аналітичну модель ймовірності потрапляння прохідних часток у площину отворів решета залежно від геометричних параметрів отворів і кута їх відхилення від поздовжньої осі; встановити критичний кут відхилення, при якому усуваються «мертві зони»;
- розробити аналітичну модель руху зернової частки по поверхні коливального решета із зигзагоподібно розміщеними отворами з урахуванням силового і кінематичного впливу решітного стану; отримати аналітичні вирази залежності швидкості частки від переміщення;
- спроектувати і виготовити дослідні зразки решітних поверхонь із різними кутами відхилення осей отворів; обґрунтувати програму і методику лабораторних досліджень на основі центрального композиційного плану другого порядку;
- встановити кількісні регресійні залежності ефективності решітної сепарації від питомої подачі зернового матеріалу, частоти коливань і кута відхилення отворів; визначити раціональні параметри за методом функції бажаності Харрінгтона;
- провести порівняльні випробування вдосконаленого і серійного решіт на зерноочисному агрегаті ЗВС-20А; вивчити вплив вологості й засміченості зернової суміші на ефективність сепарації;
- оцінити прогнозований технологічний і економічний ефект від впровадження запропонованого технічного рішення.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

– вперше встановлено аналітичну залежність ймовірності потрапляння прохідної зернової частки у площину дії отвору від кута відхилення β та геометричних параметрів решета; визначено критичний кут $\beta_{кр} \geq 4,6^\circ$ (для $l = 25$ мм), досягнення якого забезпечує повне перекриття поперечних проєкцій суміжних отворів і усування «мертвих зон» над поздовжніми перетинками;

– вперше отримано регресійні математичні моделі ефективності решітної сепарації зерна пшениці від питомої подачі, частоти коливань і кута відхилення отворів; встановлено раціональні параметри вдосконаленого решета за методом функції бажаності Харрінгтона: $q_b = 850 \dots 1050$ кг/(дм·год), $n = 440 \text{--} 490$ колив/хв, $\beta = 10^\circ$;

– отримала подальший розвиток теорія руху зернової частки на коливальному решеті із зигзагоподібним розміщенням отворів. Розроблена модель динаміки руху частки враховує основні кінематичні і конструктивні параметри решета та властивості оброблюваного матеріалу;

– отримали подальший розвиток теоретичні уявлення про закономірності руху зернового матеріалу на поверхні плоского коливального решета з урахуванням поперечної орієнтації отворів та методичні підходи до порівняльної оцінки ефективності плоских пробивних решітних поверхонь зерноочисних машин.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблено конструкцію і обґрунтовано параметри решітної поверхні із зигзагоподібним розміщенням продовгуватих отворів (кут відхилення $\beta = 10^\circ$), яке реалізується шляхом модифікації штампувального оснащення без зміни матеріалу полотна, параметрів термообробки або конструкції зерноочисного агрегату. Ефект досягається шляхом заміни стандартного решітного полотна у серійних зерноочисних машинах зокрема типу ЗВС-20А та аналогічних агрегатах на оригінальне.

Практичне застосування розробки підтверджене актами виробничих випробувань і забезпечує: підвищення ефективності сепарації зерна пшениці до 24,7 %; зниження загального вмісту домішок у зерні з 4,4% до 3,1% і смітних – з 1,4% до 0,9%, що відповідає вимогам ДСТУ 3768:2019 для 1 класу; можливе зростання граничної питомої продуктивності решітної частини на 8–12% при рівній з базовою конструкцією якості розділення. Прогнозований річний економічний ефект для господарства з площею 100 га пшениці 138000 грн на рік, при цьому строк окупності капіталовкладень на рівні 15000...20000 грн становить 3...4 місяці виробничої кампанії.

Розроблені конструкторська документація на виготовлення вдосконаленого решета, рекомендації до його використання у складі зерноочисних агрегатів загального призначення передані на підприємство по виробництву сільськогосподарської техніки ТОВ «ТЕХНОПОЛЬ».

Результати дисертаційної роботи впроваджено у навчальний процес Центральноукраїнського національного технічного університету і використовуються при підготовці здобувачів за спеціальностями «Агроінженерія» та «Галузеве машинобудування» у навчальних курсах «Теорія, конструкції і розрахунок сільськогосподарських машин», «Проектування машин та обладнання».

Обґрунтованість і достовірність наукових положень та отриманих результатів підтверджуються комплексним підходом до проведення досліджень. Так, теоретичне обґрунтування результатів базується на фундаментальних положеннях фізики, вищої математики та теоретичної механіки, що забезпечує узгодженість експериментальних даних із відомими науковими законами та підвищує рівень їх наукової достовірності. Такий підхід дозволяє вважати отримані результати науково обґрунтованими, відтворюваними та придатними для практичного застосування. Обробка отриманих експериментальних даних проводилася із застосуванням методів математичної статистики, що дозволило оцінити варіацію показників, встановити закономірності та перевірити адекватність отриманих залежностей.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати, теоретичні положення та практичні рішення, що становлять основний зміст дисертаційної роботи і виносяться на захист, отримані здобувачем самостійно в процесі виконання досліджень.

Особисто автором здійснено: критичний аналіз вітчизняних і зарубіжних літературних джерел та патентної документації з проблематики решітного очищення зернових матеріалів; виявлення принципового конструктивного недоліку серійних плоских коливальних решіт, пов'язаного з утворенням «мертвих зон» над поздовжніми перетинками при паралельному розміщенні осей отворів; формулювання наукової гіпотези щодо ефективності зигзагоподібного розміщення продовгуватих отворів як засобу активізації поперечних переміщень зернових часток і підвищення ймовірності їх просіювання.

Теоретична частина роботи виконана автором у повному обсязі: розроблено геометричну ймовірнісну модель потрапляння прохідної частки у площину отвору, аналітично встановлено критичний кут відхилення $\beta_{кр} \geq 4,6^\circ$ як умову повного усунення «мертвих зон»; побудовано динамічну модель руху зернової частки по поверхні коливального решета із зигзагоподібно розміщеними отворами з урахуванням сил тяжіння, реакції опори та тертя; отримано аналітичні вирази для швидкості частки та доведено, що поперечна компонента переміщення зростає пропорційно $\sin\beta$, що підтверджує фізичну коректність запропонованого конструктивного рішення.

Програму та методику експериментальних досліджень розроблено автором самостійно. Особисто здобувачем спроектовано і виготовлено ряд дослідних зразків решітних полотен із кутами відхилення осей отворів $\beta = 0^\circ; 3^\circ; 5^\circ; 10^\circ; 11^\circ$; сформовано матрицю центрального композиційного плану другого порядку (ЦКП 2³); проведено лабораторні досліди на сепараторі Petkus Wutha K 294A із застосуванням частотного перетворювача HE200-T3S-2R2G та контрольної-вимірювальної апаратури; виконано відбір і зважування проб прохідної і непрохідної фракцій та розрахунок ефективності сепарації.

Автором особисто здійснено статистичну обробку результатів дослідів у програмному комплексі STATISTICA 12: перевірку відтворюваності за критерієм Кохрена, значущості коефіцієнтів регресії за t -критерієм Стьюдента та адекватності моделей за F -критерієм Фішера; побудовано регресійні моделі другого порядку ефективності сепарації; виконано аналіз поверхонь відгуку і оптимізацію параметрів за методом функції бажаності Харрінгтона; проведено порівняльні дослідження вдосконаленого та серійного решіт на зерноочисному агрегаті ЗВС-20А; встановлено вплив вологості та засміченості зернового матеріалу на ефективність роботи дослідного решета.

Наукові результати дисертаційної роботи опубліковано особисто та у співавторстві в наукових фахових виданнях. У публікаціях, підготовлених у співавторстві, здобувачу належать: постановка задачі та обґрунтування напряму дослідження; розроблені аналітичні моделі ймовірності просіювання часток і динаміки їх руху на решеті із зигзагоподібно розміщеними отворами; результати планованого факторного експерименту, отримані регресійні моделі та раціональні конструктивні параметри; дані порівняльних випробувань і кількісна оцінка технологічного та економічного ефекту від впровадження запропонованого рішення. Ідеї та концептуальні рішення, запозичені зі співавторських публікацій, у тексті дисертації зазначені.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати, отримані в дисертаційній роботі були представлені, обговорені і отримали позитивні відгуки в ході проведення наступних науково-практичних конференцій: X Міжнародній науково-практичній конференції «Крамаровські читання» (НУБіП України, м. Київ, 23-24 лютого 2023 р.); XIV Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми конструювання, виробництва та експлуатації сільськогосподарської техніки» (ЦНТУ, Кропивницький, 9 листопада 2023 р.); LIII Науковій конференції викладачів, аспірантів та співробітників університету (ЦНТУ, Кропивницький, 16 травня 2024 р.); V Міжнародній науково-практичній Інтернет-конференції «ІННОВАЦІЇ: теорія і практика» (Кропивницький, Академія Прикладних наук, 2024.); Міжнародній

науково-практичній конференції «Інновації в агропромисловому комплексі, машинобудуванні та транспорті» (Національний університет водного господарства, м. Рівне, 9–10 квітня 2025 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції «Інноваційні підходи агропромислової інженерії: проблеми та перспективи» (ВНАУ, Вінниця, 30-31 жовтня 2025 р.); XXVI Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми землеробської механіки», присвяченій 125-й річниці з дня народження академіка Петра Мефодійовича Василенка (Київ, НУБІП, 17-19 жовтня 2025 р.); IX International Scientific and Practical Conference «MODERN SCIENCE: TRENDS, CHALLENGES, SOLUTIONS», Liverpool, 9-11 April 2026.

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані в 10 наукових працях: 4 наукових статтях у фахових виданнях; 5 тезах доповідей на конференціях; 1 патенті України на корисну модель.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи – 249 сторінок, основний зміст викладено на 192 сторінках комп'ютерного тексту. Робота містить 37 рисунків і 20 таблиць. Список використаних джерел налічує 135 найменувань, з них 25 іноземною мовою.

РОЗДІЛ І

СУЧАСНИЙ АНАЛІЗ СПОСОБІВ ТА ЗАСОБІВ ОЧИЩЕННЯ ЗЕРНА НА РЕШЕТАХ

1.1. Актуальність і задачі очищення зернового вороху

Зернові культури є основою продовольчої безпеки держави і важливим стратегічним ресурсом у аграрному виробництві. В Україні щорічно вирощується понад 60...80 млн тон збіжжя, переважну частину якого складає зерно пшениці, ячменю, кукурудзи та соняшника. Ефективне зберігання і подальше використання зібраного врожаю неможливе без якісної післязбиральної обробки, невід'ємним і першочерговим етапом якої є очищення зерна основної культури шляхом вилучення з вороху домішок різного походження.

Зерновий ворох, що отримується під час збирання врожаю зернозбиральними комбайнами є сумішшю, що містить значну кількість компонентів, які відрізняються своїми фізико-механічними і механіко-технологічними властивостями. Поряд із повноцінним зерном основної культури ворох може містити насіння інших культурних рослин, бур'янів, органічні домішки (фрагменти соломи, стебел, полови, листків, стручків, плівки колосків, збоїни), мінеральні домішки (частинки ґрунту, пісок, дрібне каміння), а також биті та недорозвинені зернівки основної культури та шкідники зібраного збіжжя у різних фазах розвитку. Масовий вміст усіх видів домішок у свіжозібраному воросі є надзвичайно різноманітним і залежить від виду культури, сортових особливостей, агрофону, погодних умов під час збирання та технологічної досконалості і регулювань зернозбиральної техніки. Водночас відомо, що навіть при найбільш ефективному налаштуванні сучасних зернозбиральних комбайнів, вміст домішок у воросі може становити 10...15%, а при несприятливих умовах збирання – до 25 % [1, 2].

Наявність домішок у зерновому воросі спричиняє цілий комплекс негативних наслідків технологічного та економічного характеру.

По-перше, органічні домішки – здебільш насіння, шматочки стебел, листя бур'янів, рослини що знаходяться на ранніх та середніх стадіях вегетації, маючи підвищену вологість, призводять до сильного зростання загальної середньої вологості зернової маси, активізують мікробіологічні процеси і часто виникає самозігрівання та псування всієї партії зерна протягом короткого часу після її збирання.

По-друге, наявність домішок знижує натуру зерна, що є одним із базових показників якості зібраного врожаю для всіх зернових культур.

По-третє, наявність сторонніх домішок негативно впливає на умови тривалого зберігання зерна, оскільки часто є поживним та сприятливим середовищем для розвитку грибків, бактерій і шкідників.

По-четверте, забруднення зернової матеріалу призводить до зниження класу зерна відповідно до вимог чинного стандарту, а пониження класу зібраного врожаю забезпечує суттєве зниження його вартості і цінності для подальшої переробки.

Чинні технічні умови на зерно пшениці (ДСТУ 3768:2019) [3] регламентують, що вміст смітних домішок у пшениці 1-го і 2-го класів не повинен перевищувати 1%, 3-го і 4-го класів – 2%, а зернових домішок – відповідно 3 і 5%. При цьому окремо обмежено вміст шкідливих домішок (ріжків, гірчаку, насіння геліотропу тощо) – не більше 0,05...0,1% залежно від виду домішки та класу зерна. Таким чином, нормативні вимоги до якості зерна є достатньо жорсткими і для їх виконання необхідне ефективне очищення, що є не лише актуальним агротехнічним завданням, але й обов'язковою умовою реалізації врожаю за вигідними цінами.

В роботі [4] авторським колективом Кравчука В.І. підкреслено виняткову важливість якісного завершального етапу в технології виробництва зернових культур. Авторами зазначено, що машини для збирання та первинної переробки сільськогосподарських культур, перш за все зерноочисні, визначають ефективність усього технологічного ланцюга від поля до зернового складу. Халін С.В. та Лебедев С.А. зазначають [1], що системний підхід до організації

післязбиральної обробки врожаю із застосуванням сучасного зерноочисного обладнання дозволяє суттєво скоротити загальні втрати зерна і забезпечити його якість на рівні вимог вітчизняних і міжнародних стандартів. У роботі [5] констатується, що саме на етапі первинного очищення формується базова якість зернопродукту, яка потім доводиться до вимог конкретних потреб на подальших стадіях обробки.

Серед різних методів виділення домішок – аеродинамічного, гравітаційного, трибоелектричного, магнітного, решітна сепарація залишається найбільш широко застосованою технологією очищення, завдяки найбільшій кореляції розмірів насіння і їх посівних та споживчих кондицій та відносній конструкційній простоті решітних робочих органів, відпрацьованості виробничих технологій, надійності роботи, зручності компонування із іншими видами очистки і сортування та прийнятним питомим енерговитратам [5, 6]. Принцип решітної сепарації [6, 7] базується на розмірному розділенні: частинки зернової суміші, розміри яких менші за відповідні розміри отворів решета, проходять крізь них (прохідна фракція), тоді як більші за розмірами частки залишаються на поверхні (непрохідна фракція) та рухаються на схід з решета.

Таким чином, своєчасне та ефективне очищення зернового вороху є виробничо-технологічною і економічною необхідністю, а удосконалення технічного забезпечення цього процесу – актуальним завданням аграрної галузі та сільськогосподарського машинобудування.

1.2. Класифікація способів і технічного забезпечення очищення зернових культур

1.2.1. Способи очищення зернових культур

В основі технічних засобів для очищення зернових культур покладено розділення компонентів зернового вороху за їхніми розмірними, аеродинамічними або іншими властивостями [2, 6]. У вітчизняній і зарубіжній науці та практиці склалася різна класифікація способів і відповідного

технічного забезпечення, яка включає як традиційні, так і новітні підходи до реалізації очисних робіт [10, 11, 12].

Решітне (ситове) очищення – один з найстаріших і найбільш поширених способів, що ґрунтується на розділенні компонентів зернової суміші за геометричними розмірами частинок [4, 6, 7]. Матеріал, який потребує очищення подається на перфоровану поверхню – решето, на якому частинки, що мають менші розміри, ніж отвори (прохідні частинки), проходять крізь них, а більші (сходові) – переміщуються по поверхні решета до сходу з нього. Решітне очищення забезпечує розділення зернової маси за товщиною (решета з продовгуватими отворами), шириною (решета з круглими отворами).

Застосування решітної сепарації є незамінним способом якісної післязбиральної обробки зернового вороху практично всіх зернових культур, що використовується у складі зерноочисних машин загального призначення всіх поколінь [13].

Пневматичне (повітряне) очищення – спосіб, що базується на відмінності аеродинамічних властивостей (швидкостей витання) компонентів зернового вороху в потоці повітря [8, 9]. Потік повітря певної швидкості виносить легкі частинки (полову, пил, порожні зерна тощо) із зони обробки, тоді як важкі частинки (повноцінне зерно) продовжують рух або осідають [14, 15]. Цей спосіб є найбільш ефективним для видалення органічних легких домішок, але не придатний для розділення компонентів з близькими аеродинамічними характеристиками.

Значний внесок у дослідження і розвиток систем повітряного очищення зробили Котов Б. І. та Степаненко С. П. [16, 17]. Авторами досліджено математичні моделі аеродинамічної сепарації попередньо розшарованої та нерозшарованої зернової суміші у вертикальному та похилому пневматичному каналах та встановлено ефективні умови і конструктивні параметри сепараторів для видалення аеродинамічно легких домішок.

Трієрне очищення – спосіб поділу компонентів за довжиною частинок, що здійснюється за допомогою обертового комірчастого циліндра або диска.

Частинки, довжина яких відповідає розміру комірки, захоплюються нею і виносяться, тоді як інші не захоплюються. Трієри широко застосовуються для виділення насіння бур'янів і хвостиків (вівсюжні та кукільні трієри), що мають ті самі розміри поперечного перерізу, що й зерна основної культури [18, 19]. Алієв Е.Б. та Лупко К.О. [18] розробили методику симуляції процесу сепарації насіннєвого матеріалу дрібнонасінневих культур на циліндричному чарунковому трієрі, яка базується на застосуванні методу скінченних елементів і дозволяє прогнозувати ефективність трієрного очищення для різних сортів насіння. Алієв Е.Б. у дисертаційній роботі [19] обґрунтував механіко-технологічні основи прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику на трієрних сепараторах і розробив конструктивні схеми нового покоління машин.

Гравітаційне (вібропневматичне) очищення – спосіб розділення зернових сумішей за щільністю у режимі псевдозрідженого шару, що утворюється під одночасною дією вібрацій похиленого перфорованої поверхні та висхідного потоку повітря [20-24]. У псевдозрідженому шарі важчі частинки (щільне повноцінне зерно) осідають донизу і рухаються в один бік, а легші (щупле зерно, вражене хворобами зернини) піднімаються догори і рухаються в за іншим напрямком [21, 23]. Степаненко С.П. у серії фундаментальних досліджень [23, 25] провів аналітичні і технологічні обґрунтування процесів вібропневматичного розділення зернових матеріалів, включаючи теоретичні передумови інтенсифікації вібропневматичної сепарації на решетах і моделювання руху зернового матеріалу на поверхні деки вібропневмоімпульсного сепаратора. Проведені дослідження підтвердили, що використання пульсуючого потоку повітря дозволяє значно інтенсифікувати процес псевдозрідження і підвищити ефективність розділення за щільністю.

Магнітна сепарація – використовується для виділення феромагнітних домішок (шматочків металу, дроту тощо) і є обов'язковою операцією в технологічних лініях для захисту переробного обладнання [10]. Магнітні сепаратори встановлюються в потокових лініях переробки зернового матеріалу

і практично повністю виключають потрапляння металевих домішок у очищене збіжжя.

Електростатична сепарація – відносно новий спосіб розділення сипких матеріалів за електрофізичними характеристиками, застосовується переважно для відокремлення насіння з низькою електропровідністю від компонентів з вищою провідністю [1, 6]. Широкого практичного застосування в масовому очищенні зернових культур ще не набула.

Повітряно-решітне очищення є комбінацією решітної та пневматичної сепарації і сьогодні залишається найпоширенішим технологічним принципом у зерноочисних машинах загального призначення [6, 27]. Одночасна або послідовна дія решітних поверхонь і пневматичних каналів дозволяє комплексно видаляти із зернового матеріалу домішки як за геометричними розмірами, так і за аеродинамічними властивостями, що суттєво підвищує якість очищення порівняно з кожним способом окремо. Brasacescu С., Gageanu I., Popescu S., Selvi К.С. [26] підтвердили, що комбінація механічного і аеродинамічного принципів у вібруючих решетах з повітряними потоками забезпечує суттєве підвищення ефективності відокремлення домішок від зернової маси всіх злакових культур. Крім того, доводиться доцільність реалізації повітряно-решітного очищення в роботі [27], при цьому можуть використовуватися різні принципи поєднання повітряних і решітних частин зерноочисних машин, може бути різна послідовність повітряного і решітного очищення, відмінні конструкції і режими роботи тощо.

Слід зазначити, що в реальних виробничих умовах описані вище способи сепарації, які засновані на одному принципі розділення компонентів зерносуміші не застосовуються у чистому вигляді. На всіх серійних зерноочисних машинах загального призначення як правило реалізується поєднання кількох принципів сепарації і межах одного агрегату [28, 29, 30]. Проте, як свідчить аналіз конструкцій технічних засобів, решітне очищення на плоских коливальних решетах у поєднанні з повітряним розділенням є базовим

і незамінним для всього спектру операцій від попереднього до вторинного очищення зернових культур та їх сортування [31, 32].

Сьогодні, з розвитком пневматичних сепараторів, достатньо часто спостерігається неузгодженість продуктивностей повітряної та решітної частин, що стримує зростання загальної продуктивності зерноочисних агрегатів, причому саме решітне очищення і обмежує загальну продуктивність виконання операції, а отже питання інтенсифікації роботи решітних частин зерноочисних машин набуло нової актуальності [33].

1.2.2. Решітне очищення: фізичний принцип та місце в технологічному процесі

Незважаючи на розвиток зерноочисної техніки в напрямку інтенсифікації на відцентрових високопродуктивних робочих органах IV і V поколінь [33, 34], серійне виробництво і використання класичних – плоских коливальних (вібраційних) решіт III покоління залишається одним із найбільш поширених не тільки в Україні, а й у світі. Це обумовлено простотою і надійністю конструкції, відпрацьованістю технологічного процесу і узгодженістю показників роботи основних – повітряно-решітних і допоміжних – транспортуючих робочих органів зерноочисних машин.

Принцип функціонування традиційного плоского решета ґрунтується на розділенні компонентів суміші за відповідними геометричними розмірами частинок, формуванні прохідної і сходової фракції на перфорованій робочій поверхні, встановленій під кутом, меншим кута тертя часток, яка здійснює коливальні рухи, забезпечуючи поздовжнє переміщення матеріалу [35, 36].

Вирішальну роль у процесі решітної сепарації відіграє конструкція решета – насамперед форма, розміри і розташування отворів, а також матеріал і технологія виготовлення полотна [37]. У науковій і патентній літературі описано широкий асортимент конструктивних рішень. Зокрема, Васильковський О.М., Лещенко С.М., Мороз С.М. та Нестеренко О.В. сформулювали концепцію «ідеального решета» зернового сепаратора [38],

відзначаючи, що жодна з відомих конструкцій повністю не реалізує всі бажані властивості.

Залежно від того, який саме геометричний параметр частинки є визначальним для сепарації, решітне очищення зернових культур умовно поділяється на:

- розділення за шириною – проводиться на решетах з круглими отворами; через такі отвори просіваються частки, ширина яких менша за діаметр отвору;
- розділення за товщиною – здійснюється на решетах із продовгуватими отворами, які зорієнтовано паралельно до напрямку руху матеріалу; через такі отвори просіваються частки, товщина яких менша за ширину щілинного отвору.

За кінематикою руху решіт можна виділити:

- коливальні (вібраційні) робочі органи – решета, які під час виконання технологічного процесу здійснюють зворотно-поступальний, круговий або інший коливальний рух. Саме такі решета є найбільш поширеними і працюють у переважній кількості зерноочисних машин загального призначення. При цьому термін «вібраційні решета», не мають принципової технічної відмінності і є різновидом коливальних робочих органів, що здійснюють рух з великою частотою (понад 1000 коливань/хв) малою амплітудою (менше 2 мм);
- барабанні (циліндричні) решета – робочі органи у яких матеріал переміщується всередині обертального циліндричного барабана. Вони можуть бути тихохідними, з показником кінематичного режиму $K < 1$, які при роботі характеризуються меншим рівнем шуму та вібрацій, або швидкохідними, у яких $K > 1$, що мають суттєві переваги щодо технологічної ефективності роботи, але менш надійні і більш шумні;
- дискові та роторні решета – застосовуються у експериментальних спеціалізованих зерноочисних машинах і обладнанні і, на сьогоднішній день, не мають серійного виробництва.

За траєкторією руху решіт розрізняють:

- решета з прямолінійними коливаннями (траєкторія близька до прямої лінії), які застосовуються у більшості машин загального і спеціального призначення;
- решета з круговими (гіраційними, орбітальними) або еліптичними коливаннями, які використовуються переважно у переробній, зокрема, борошномельній промисловості.

За розташуванням у просторі, переважна кількість решітних робочих органів встановлюється під кутом до горизонту (в більшості серійних агрегатів кут нахилу робочої поверхні не перевищує 10...15°). Однак, відомі циліндричні сепаратори, встановлені горизонтально або вертикально.

Решітне очищення у виробництві проводиться на різних етапах післязбиральної обробки зерна:

- попереднє очищення здійснюється відразу після збирання з метою якнайшвидшого зниження загальної вологості зернового вороху та видалення крупних домішок;
- первинне очищення – основний технологічний етап, що забезпечує доведення зерна до вимог стандарту за чистотою;
- вторинне (спеціальне) очищення, що дозволяє використовувати оброблений матеріал для насінневих цілей.

На кожному з цих етапів використовуються решета з різними формою і розмірами отворів, підібраними відповідно до видових і сортових особливостей культури, яка потребує очищення та бажаного результату сепарації.

Ефективність роботи решітних частин ЗОМ у значній мірі визначається геометричними розмірами решітного полотна та коефіцієнтом живого перерізу ε , що визначається відомим виразом [27]:

$$\varepsilon = \frac{F_{омв}}{F_{заг}} \cdot 100\% , \quad (1.1)$$

де $F_{отв}$ – сумарна площа отворів решета, м²;

$F_{заг}$ – загальна площа решітного полотна, м².

Для решіт з продовгуватими отворами, що розміщені паралельно поздовжній осі [39], коефіцієнт живого перерізу визначається наступним чином:

$$\varepsilon = \frac{l \cdot b}{(l + t_1)(b + t_2)} \cdot 100\%, \quad (1.2)$$

де l , b – відповідно довжина і ширина отвору, мм;

t_1 , t_2 – товщина поздовжньої і поперечної перетинок, мм.

Для серійних решіт зерноочисних машин загального призначення коефіцієнт живого перерізу решіт, як правило, знаходиться в межах 35...55% [10, 27]. Збільшення ε теоретично має підвищувати продуктивність, однак надмірне зростання цього показника призводить до зниження міцності решітного полотна і складності виготовлення штампуванням.

Форма отворів (рис. 1.1) на робочій поверхні решета визначає принцип розділення компонентів зернової суміші.

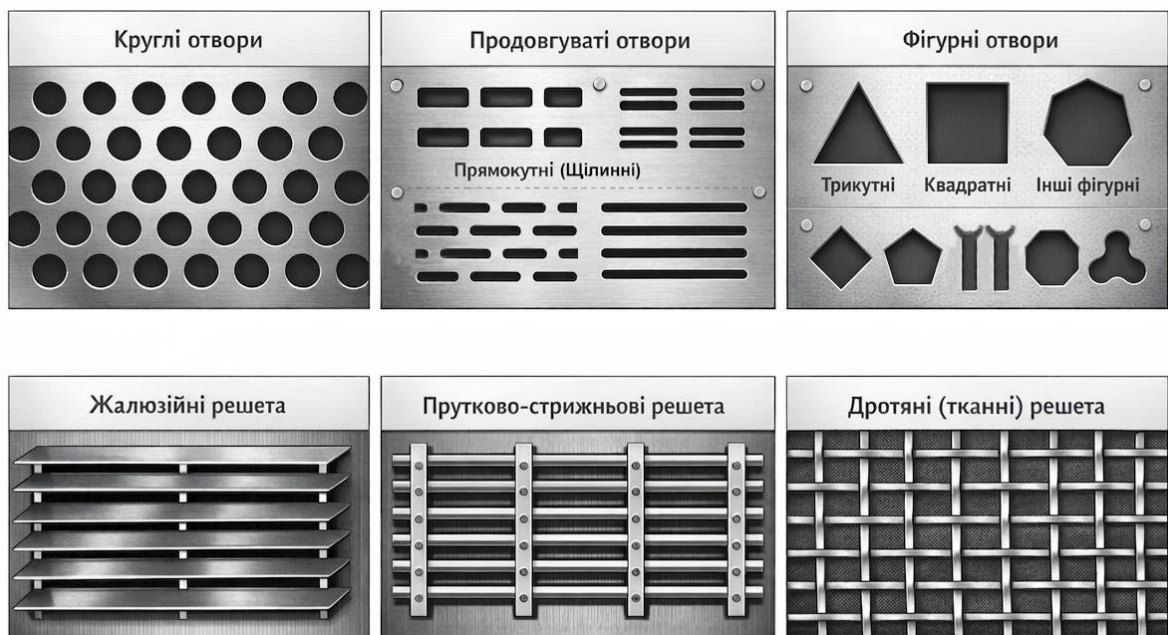


Рис. 1.1. Форми робочих отворів решіт зерноочисних машин

За формою бувають наступні отвори на решетах (рис. 1.1):

- круглі отвори – найпростіші у виготовленні, забезпечують розділення за шириною для округлих чи близьких до круглих форм зернівок; діаметр отворів може бути в діапазоні 0,8...40 мм і підбирається залежно від культури і призначення решета. Решета із круглими отворами характеризуються відносно невисоким коефіцієнтом живого перерізу (часткою площі отворів до загальної площі поверхні), що знижує питому продуктивність;
- продовгуваті (прямокутні, щілинні) отвори – дозволяють проводити розділення матеріалів за товщиною або шириною; в більшості серійних агрегатів ширина отворів решіт 0,5...10,0 мм, довжина – 10...50 мм, причому отворами з меншою шириною відповідають їх менші довжини і навпаки. Решета з продовгуватими отворами є більш ефективними при виділенні домішок, що мають схожу ширину з основним зерном, але відрізняються товщиною (щупле зерно, насіння дрібного бур'яну), важливими у насінництві, оскільки товщина насіння, як відомо, найбільше корелює з його масою, а маса визначає біологічну цінність зерна. Крім того, такі решета мають більший коефіцієнт живого перерізу порівняно з решетами з круглими отворами;
- трикутні, квадратні та інші фігурні (нестандартні) отвори – використовуються для специфічних завдань сепарації насіння культур зі складною формою зернівок, переважно зустрічаються у спеціалізованих машинах і зерноочисних агрегатах;
- жалюзійні решета – складаються з рядів рухомих пластин, що регулюють розмір щілин; широко застосовуються у соломотрясах і очисних пристроях зернозбиральних комбайнів;
- прутково-стрижньові решета – виготовляються зі сталевих прутків і відрізняються підвищеною міцністю та довговічністю; застосовуються переважно для грубого попереднього очищення і сортування великих партій зерна;

- дротяні (тканні) решета – виготовляються з металевого дроту, переплетеного у вигляді сітки; відрізняються значним живим перерізом, але мають нижчу жорсткість і більш схильні до забивання у порівнянні зі штампованими.

Розміщення отворів на полотні решета визначає рівномірність розподілу матеріалу по його робочій поверхні:

- пряме (паралельне) розміщення – отвори правильними рядами паралельно осі решета; найпростіший, але не найефективніший варіант;
- шахове розміщення – отвори сусідніх рядів зміщені на пів-кроку; таке розміщення підвищує рівномірність використання поверхні, однак складніше у виготовленні і знижує міцність;
- нахилене розміщення – осі отворів відхилені від поздовжньої осі на певний кут β , що забезпечує активізацію поперечного переміщення матеріалу [40] під час руху по робочій поверхні.

Академік Тіщенко Л.М. в дисертаційній роботі, присвяченій науковим основам вібровідцентрового сепарування зернових сумішей [41], підкреслював визначальний вплив форми і розмірів отворів решета на якість та продуктивність сепарації. Також вчені Brasacescu C., Gageanu I., Popescu S., Selvi K.C. [26] у своїх дослідженнях по відокремленню домішок із зернових сумішей за допомогою решіт у потоках повітря довели, що геометричні параметри перфорованих поверхонь принципово визначають умови контакту частинок із кромками отворів і, відповідно, ймовірність проходження часток крізь отвори.

Серед різноманітних типів решітних робочих органів плоскі коливальні решета (плоскорешітні сепаратори з зворотно-поступальним або коливальним рухом решітного стану) займають головне місце у серійних агрегатах загального призначення (рис. 1.2). Таке поширення плоских коливальних решіт пояснюється конструктивною простотою, відносно невисокою вартістю виготовлення і обслуговування, а також достатньою ефективністю при попередньому та первинному очищенні всього спектру зернових культур.

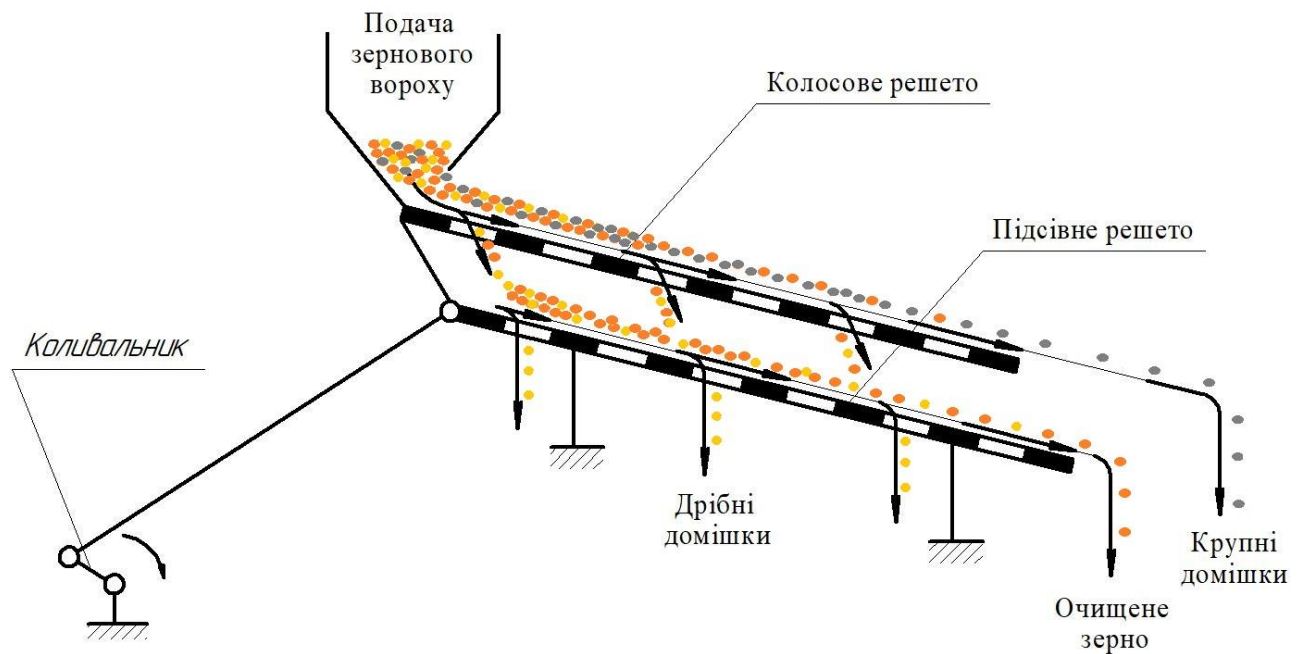


Рис. 1.2. Схема роботи плоскорешітного коливального сепаратора

У більшості серійних ЗОМ загального призначення решітний стан, на якому закріплено одне або кілька решіт різних типорозмірів, отримує від привідного механізму зворотно-поступальний або інший коливальний (вібраційний) рух. Завдяки нахилу решета і параметрам коливань – амплітуді та частоті – зернова маса рухається вздовж поверхні решета. В процесі цього руху частинки, розміри яких менші за розміри отворів, отримують орієнтацію у просторі та потрапляють у площину отвору, де під дією гравітаційної та інерційної сил проходять крізь нього [42, 43].

Для характеристики режиму коливань решітного стану використовується безрозмірний показник кінематичного режиму (число Фруда), що визначає співвідношення відцентрового прискорення коливального руху до прискорення вільного падіння. При числі Фруда менше одиниці матеріал здійснює безперервний контакт із поверхнею решета (режим ковзання), а при значеннях, більших одиниці, – відбувається відривання матеріалу від поверхні, що суттєво інтенсифікує міжшарову взаємодію часток під час сепарації [27].

Серед основних конструктивних і технологічних параметрів плоского коливального решета виділяють [6, 10, 27, 41]:

- амплітуду коливань – визначає шлях, що проходить решето за один напівцикл; від цього параметра залежить інтенсивність міжшарового переміщення часток і показник кінематичного режиму;
- частоту коливань – кількість двосторонніх коливань за одиницю часу; разом з амплітудою визначає кінематичний режим роботи решета;
- кут нахилу решета – визначає складову гравітаційної сили, спрямовану вздовж поверхні решета, і є одним з найбільш впливових параметрів на швидкість руху та ефективність сепарації матеріалу [40];
- питому подачу – масу зернового матеріалу, що надходить на одиницю ширини (або площі) решета за одиницю часу; перевантаження решета є однією з головних причин загального зниження якості очищення [40, 44];
- напрямок коливань (кут між напрямком коливань і горизонтальною площиною) – визначає характер руху матеріалу по поверхні.

Таким чином, аналіз фізичного принципу решітного очищення та конструктивно-технологічних особливостей плоских коливальних решіт свідчить, що саме такі робочі органи залишаються традиційним етапом технологічного процесу післязбиральної обробки зерна.

Ефективність сепарації визначається комплексною дією геометричних параметрів решітного полотна (форма, розміри, розташування отворів, коефіцієнт живого перерізу тощо), а також кінематичних режимів роботи (амплітуда, частота, кут нахилу, напрямок коливань, питома подача матеріалу).

Незважаючи на конструктивну простоту та широке застосування, серійні плоскі коливальні решета не повністю реалізують потенціал щодо інтенсифікації розділення компонентів зернової суміші [44]. Підвищення коефіцієнта живого перерізу обмежується вимогами міцності й транспортуючої здатності; нераціональне розташування отворів знижує рівномірність використання робочої поверхні; перевантаження та неправильно підібраний кінематичний режим призводять до зниження якості очищення, підвищеного забивання отворів і зростання втрат повноцінного зерна.

Отже, вдосконалення плоских коливальних решіт шляхом узгодження форми та просторового розміщення отворів, підвищення ймовірності потрапляння часток у зону дії отворів та обґрунтування раціональних кінематичних параметрів з метою інтенсифікації процесу сепарації є важливою науковою задачею і практично доцільним напрямом удосконалення класичних решітних робочих органів зерноочисних машин, що дозволить підвищити їх продуктивність, стабілізувати технологічний процес на різних етапах очищення та забезпечити покращення якісних показників готової продукції при зниженні енергетичних витрат.

1.2.3. Конструктивні особливості серійних ЗОМ із решітними робочими органами

В господарствах України для післязбирального обробітку зібраного врожаю використовуються зерноочисні машини загального призначення і агрегати для попереднього і первинного очищення переважно вітчизняні, хоча дедалі більше зустрічаються і сепаратори закордонного виробництва. Це самохідні або стаціонарні машини, що здійснюють повітряно-решітне післякомбайнове очищення зернового вороху.

Ряд вітчизняних виробників, зокрема ТОВ «Еліттех-Україна» [42], Завод МОРОЗА [46], Завод сільгоспмашин (м. Лубни Полтавської області та с. Китайгород Царичанського району Дніпропетровської області) [47] та ін. виробляють зерноочисні машини, які найчастіше зустрічаються у господарствах а їх конструкція стала класичною, це зерноочисні машини типу ОВС-25 (рис. 1.3), ОВС-25С, ОВУ-25, ОВП-20А, ЗВС-20А (рис. 1.4) і їх різні модифікації (різні за продуктивністю і за маркуванням), та окремо зерноочисні агрегати для зерноочисно-сушильних комплексів типу (ЗАВ-10.30.000) ЗАВ-20, ЗАВ-40, ЗАВ-50 та ін.

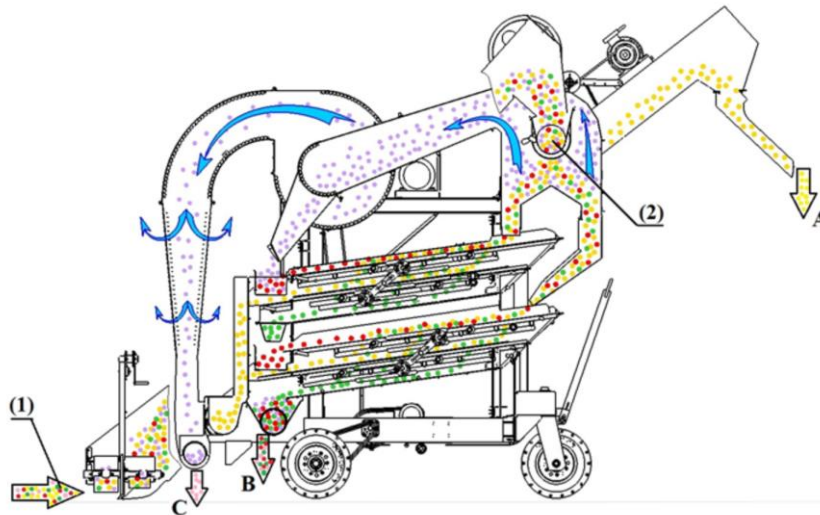


Рис. 1.3. Схема роботи зерноочисної машини ОВС-25:

1 – подача зернового вороху на очистку; 2 – сепарація вороху;
 А – виведення очищеного зерна; В – виведення дрібних, крупних і легких
 домішок; С – виведення легких домішок і пилу

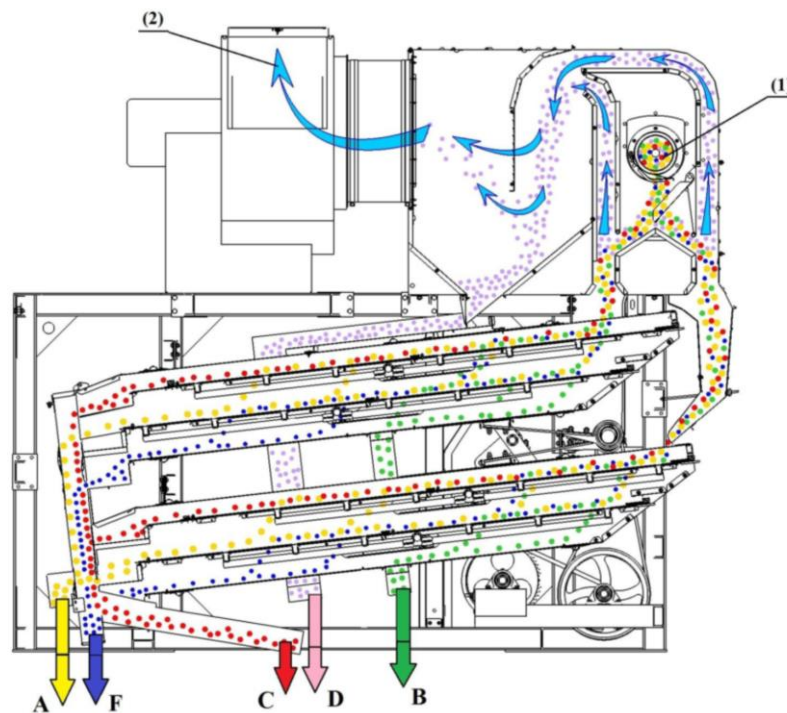


Рис. 1.4. Схема роботи зерноочисної машини ЗВС-20А, що може входити до
 складу зерноочисних агрегатів типу ЗАВ, КЗС:

1 – подача вороху на очищення; 2 – виведення повітря з легкими домішками;
 А – очищене зерно; В – дрібні домішки; С – крупні домішки; D – легкі
 домішки; F – фуражне зерно

Основними перевагами решітних частин такого класичного зерноочисного обладнання є:

- конструктивна простота та надійність механізму привода;
- відносно рівномірний рух зернового матеріалу по всій ширині решета;
- відносно проста заміна решіт та регулювання повітряної частини при переході на іншу культуру;
- порівняно невеликі динамічні навантаження на несучу конструкцію машини при використанні балансувальних противаг або двох протифазних решітних станів.

Однак, робота зерноочисних машин такого типу супроводжується і рядом недоліків, основні серед яких:

- обмежена швидкість руху матеріалу по решету, що знижує питому продуктивність;
- нерівномірний розподіл зернового матеріалу по поверхні решета при нерівномірній подачі вороху на очищення;
- схильність отворів до забивання матеріалом, особливо при підвищеному вмісті вологих і дрібних органічних домішок;
- низька інтенсивність перемішування зернового матеріалу при проходженні решета у поперечному напрямку, що знижує ймовірність ефективного орієнтування частинок відносно отворів решета.

Виробник зерноочисного обладнання «Аеромех» [48] достатньо тривалий час поряд із аеродинамічними сепараторами САД створює і реалізує решітні сепаратори попереднього очищення СПО-8, СПО-16, які пропонуються як додаткове обладнання до аеродинамічних ЗОМ. Сепаратори СПО надійно видаляють із зернового матеріалу дрібно- або грубозернисті продукти, частинки соломи, не обмолочені колоски тощо, однак, як і інші робочі органи із плоскими решетами, характеризуються різким зниженням якісних показників роботи при підвищених навантаженнях, високою ймовірністю забивання отворів решіт та високою нерівномірністю завантаження робочої поверхні решіт під час очищення зерна.

Хорольський механічний завод [49] виготовляє зерноочисні сепаратори типу БСХ, а саме – БСХ-6; БСХ-12; БСХ-16; БСХ-100; БСХ-150; БСХ-200 та ін. Поряд із зазначеними агрегатами ТОВ «ОЛІС» [50] виготовляє серію зернових сепараторів плоско-решітного типу ПСО (рис. 1.5) (ПСО-3; ПСО-50; ПСО-100). Крім перелічених раніше до сепараторів з плоскими ситами відносяться сепаратор БІС, сепаратор БЛС та сепаратор БСХ (модельний ряд А1-БІС-12, А1-БІС-100, А1-БІС-150; А1-БЛС-12, А1-БЛС-16, А1-БЛ-100, А1-БЛС-150 БСХ-3, БСХ-12, БСХ-16, сепаратор БСХ-100 (БСХ-100), БСХ-200, БСХ-300). До недоліків цих агрегатів, як і інших зерноочисних машин вітчизняного виробництва, традиційно відносять використання конструктивно простих плоских коливальних решіт зі стандартним розміщенням отворів без інноваційних рішень щодо інтенсифікації сепарації; недостатню гнучкість у підборі технологічних режимів для різних культур; відносно невисоку питому продуктивність. Проте ці машини забезпечують прийнятне співвідношення ціни і продуктивності та є доступними для фермерських господарств і переробних підприємств різного розміру.

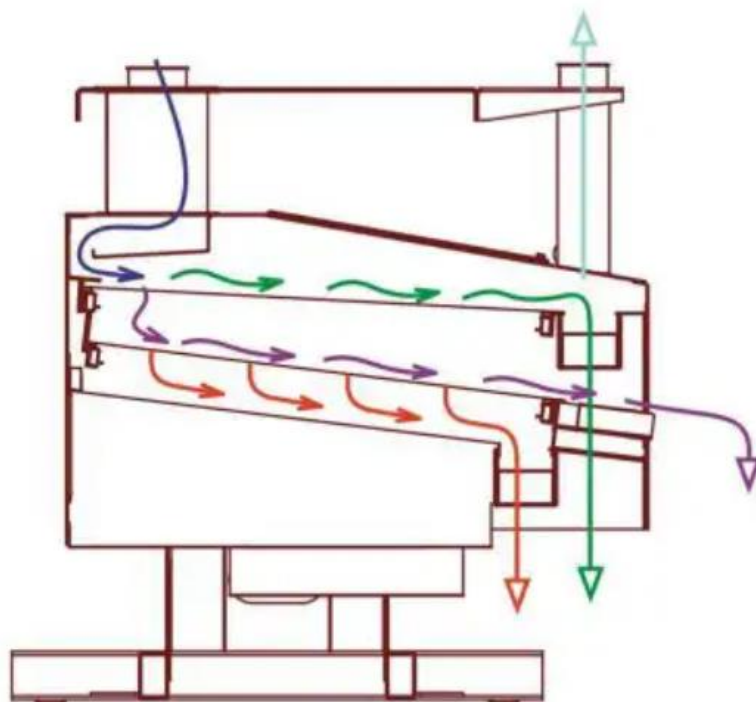


Рис. 1.5. Схема очищення зерна у зерновому сепараторі ПСО

Серед закордонних виробників, зерноочисне обладнання яких використовуються в господарствах України слід відмітити наступні. «BÜHLER GROUP» (Швейцарія/Німеччина) [51] є одним із найбільших у світі виробників зерноочисного та переробного обладнання. В останні роки на токах господарств зустрічається зерноочисна машина GrainPlus LAGA (рис. 1.6) – це компактний вібраційний сепаратор для попереднього та первинного очищення зібраного врожаю.

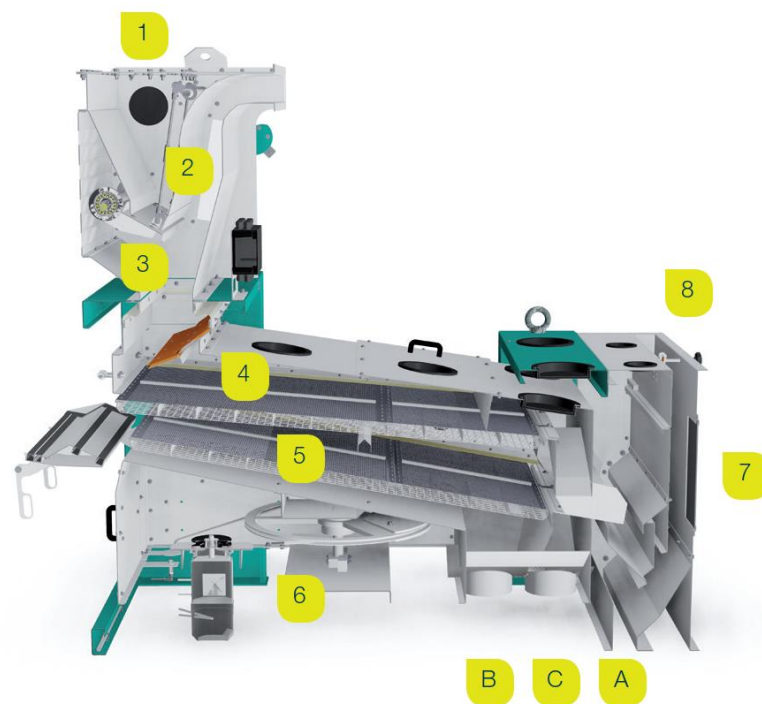


Рис. 1.6. Зерноочисна машина GrainPlus LAGA виробника «BÜHLER GROUP»:

- 1 – завантаження збіжжя на очищення; 2 – вібруючий впускний клапан;
- 3 – аспірація на вході; 4 – попереднє виділення крупних домішок; 5 – основна сепарація; 6 – привід ситового кузова; 7 – вертикальний повітряний канал;
- 8 – підведення повітря (система аспірації)
- A – 1-й сорт; B – 2-й сорт; C – грубі домішки

Конструктивною особливістю сепаратора є дворівнева система очищення із швидкою заміною решіт (до 20 хвилин), регульована система аспірації, гумові кульки для самоочищення решітних полотен. Ефективність очищення зерна пшениці зерноочисною машиною GrainPlus LAGA при питомій подачі до

1200 кг/(дм·год) досягає 82...88%. Інша більш продуктивна модель виробника «BÜHLER GROUP» – TAS Universal Cleaning Machine, яка призначена для великих елеваторів і зернопереробних підприємств. Площа решіт – до 48 м², продуктивність – до 400 т/год, реалізуються кругові коливання решіт, що забезпечують рівномірне розподілення матеріалу по всій ширині робочої поверхні.

«PETKUS Technologie» (Німеччина) [52] – один із найстаріших виробників зерноочисних машин (засновано 1852 р.), асортимент якого охоплює весь спектр обладнання для обробки зерна і насіння. Лінійка Agri Cleaner A-Cleaner включає машини продуктивністю 15-100 т/год із двоярусними решітними станами і тристадійним аспіраційним очищенням. Лабораторний сепаратор Petkus Wutha K294 A широко застосовується у науково-дослідних установах для лабораторних досліджень і відтворення технологічних режимів реальних виробничих машин.

«SATAKE CORPORATION» (Японія) [53] – японський лідер у галузі переробки зерна. Машини серії Satake RGB/DFNA реалізують принцип рівномірного розподілення матеріалу по ширині за допомогою оригінальних патентованих систем подачі. Відмінністю решітних частин даного виробника є використання гофрованих решіт спеціальної конструкції. Характерна особливість таких зерноочисних агрегатів – широке застосування електронних систем контролю та регулювання режимів роботи. Питома продуктивність при очищенні рису та пшениці – до 1800 кг/(дм·год) при ефективності 85-92%.

«MMSTECH» (Туреччина) [54] виробляє вібраційні сепаратори для агропромислового ринку. Машина Vibro Cleaner VCV використовує подвійний ярус решіт з регульованою системою аспірації та оригінальним пристроєм рівномірної подачі, що забезпечує однорідність навантаження за шириною решета.

«SCHNEIDER JAQUET» (Франція) [55] – виробник, відомий впровадженням планетарного руху решіт. Замість традиційного поздовжнього зворотно-поступального руху в зерноочисних агрегатах цього виробника

застосовується рух із планетарною траєкторією, що забезпечує більш рівномірний розподіл матеріалу по всій площі решета та підвищений контакт часток із поверхнею отворів. За результатами виробничих випробувань питома продуктивність машин «SCHNEIDER JAQUET» на 15-25% вища, ніж у зерноочисних агрегатів із лінійним рухом решіт.

Незважаючи на виробників та сімейства і покоління зерноочисного обладнання, агрегати із решітною сепарацією зернових сумішей залишаються актуальними а підходи до роботи решітних робочих органів, підвищення питомої продуктивності і якості очищення, зниження забивання отворів, збільшення площі решітних поверхонь, зниження травмування зерна і насіння при очищенні тощо потребують подальших допрацювань і вдосконалень. Порівняльна оцінка конструкцій серійних решітних органів у вигляді систематизованого порівняння типових конструктивних рішень і характеристик наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Порівняльна характеристика найбільш поширених типів решітних органів
серійних ЗОМ загального призначення

Тип решета	Питома продуктивність, кг/(дм·год)	Ефективність, %	Забивання отворів	Травмування зерна	Складність виготовлення
Штамповане із паралельними продовгуватими отворами	700...1200	65...78	Середнє	Низьке	Низька
Штамповане з рифленою поверхнею	800...1300	72...82	Нижче середнього	Низьке	Середня
Прутково-стрижневе	900...1500	78...88	Нижче середнього	Середнє	Висока
Струнне пасивне	1000...1600	80...90	Низьке	Низьке	Дуже висока
Штамповане із орбітальним рухом	900...1400	75...87	Нижче середнього	Низьке	Висока (привід)

Таким чином, узагальнюючи роботу решітних робочих органів зерноочисних машин, можна виділити наступні переваги: висока продуктивність, зокрема при очистці не перезволоженого зернового вороху [56]; багатofракційний поділ, коли в межах одного зерноочисного агрегату можна забезпечити одночасний розподіл компонентів зернової суміші на кілька фракцій за розміром (зазвичай 3-5 фракцій) [57, 58]; простота конструкції і універсальність агрегатів, адже одна машина може обробляти злакові (пшениця, ячмінь, жито, овес), зернобобові (горох, соя, квасоля), олійні (соняшник, ріпак) та інші технічні культури при простій заміні решіт; точність сепарації, при правильному підборі решіт і режимів роботи забезпечується висока точність поділу за геометричними розмірами (до 0,5 мм різниці); енергоефективність – решітні робочі органи споживають менше енергії на тону обробленого зерна порівняно з пневматичними сепараторами; гнучка можливість до масштабування, від малих машин для фермерських господарств (5...10 т/год) до потужних промислових агрегатів (300 т/год); можливість інтеграції – легко компонується в автоматизовані технологічні лінії з іншим обладнанням (сушарки, силоси, триєри, пневмосепаратори тощо).

До основних недоліків роботи решітного очищення можна віднести:

- високу чутливість до вологості зернового вороху, адже має місце зниження ефективності при підвищеній вологості зерна (понад 18%) [2, б]: вологе зерно злипається, погано просіюється і забиває отвори решіт. При вологості понад 20% ефективність очищення може знизитися на 40...50%;
- ефект відскоку зерна – при збільшенні кута нахилу або частоти коливань компоненти зернової суміші відскакують від поверхні решета, що погіршує якість решітного очищення [27]. Раціональний режим роботи решітних частин ЗОМ потребує точного налаштування для кожної культури;

- обмежена гнучкість фракціонування – верхнє решето видаляє лише крупні домішки, нижнє – лише дрібні; менша гнучкість порівняно з роторними або оптичними сепараторами [10];
- забивання отворів – при роботі з плоским насінням (льон, ріпак, кукурудза) або із зерном підвищеної вологості отвори решіт швидко забиваються. Для забезпечення роботоздатності потрібні спеціальні очищувачі (щітки, гумові кульки) або активатори решіт [1, 24, 38, 61, 62];
- енерговитрати на коливання – для забезпечення необхідної амплітуди і частоти коливань решіт потрібна відносно велика витрата енергії, особливо при великій сумарній площі решітних поверхонь [38];
- вібрація і шум – плоскорешітні сепаратори створюють значну вібрацію, що вимагає наявності масивного фундаменту для установки стаціонарних машин і може призводити до руйнування конструкцій через втомлюваність. Рівень шуму серійних зерноочисних агрегатів досягає 80...90 дБ.;
- залежність від якості решіт – ефективність сепарації критично залежить від якості виготовлення решіт (точність отворів, рівність поверхні, жорсткість, матеріал виготовлення). Решета, виготовлені із неякісного дешевого матеріалу швидко деформуються, змінюється геометрія робочої поверхні і знижують якість очищення.

1.3. Способи і засоби інтенсифікації роботи решітного очищення зерна

1.3.1. Загальна класифікація методів інтенсифікації решітної сепарації

Інтенсифікація процесу решітної сепарації реалізується через активізацію внутрішньосферних процесів у зерновому матеріалі – переміщення і перемішування часток у вертикальному, поздовжньому та поперечному напрямках, що підвищує ймовірність контакту прохідних часток з поверхнею отворів решета.

На основі аналізу наукових публікацій можна виділити наступні групи методів інтенсифікації:

- Група I. Оптимізація кінематичних режимів коливального руху.
- Група II. Пристрої-активатори і сегрегатори на решітній поверхні.
- Група III. Комбіновані та нетрадиційні кінематичні схеми.
- Група IV. Вдосконалення геометрії і розміщення отворів.
- Група V. Поєднання решітної та аеродинамічної сепарації.

1.3.2. Оптимізація кінематичних режимів коливань: теоретичні засади та практичні результати

Переміщення зернового матеріалу по решітній поверхні та активізація внутрішньосферних процесів визначаються кінематичними параметрами коливального руху: ексцентриситетом коливальника R , кутовою швидкістю $\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$ та формою траєкторії. Для коливального режиму рух матеріалу по решету вздовж поздовжньої осі відбувається внаслідок наявності його коливань.

Критерієм інтенсивності режиму руху матеріалу по решеті є показник кінематичного режиму [64-67] – критерій Фруда – відношення максимального прискорення решета до прискорення вільного падіння:

$$K = \frac{\omega^2 \cdot R}{g} = \frac{(\pi \cdot n)^2 \cdot R}{900 \cdot g}. \quad (1.3)$$

При $K < 1$ матеріал під час руху не відривається від поверхні решета (режим ковзання) – найкращий режим руху для плоских решіт. При $K = 1$ починається режим роботи, за якого частки при русі по решету підкидаються. І за умови, коли $K > 1$ частинки відриваються і мають місце параболічні траєкторії руху цих частинок. Проте, для вібровідцентрових решіт

раціональний режим для зерна пшениці при первинному очищенні – $K = 2,5 \dots 4,0$, що встановлено за дослідженнями Тіщенко Л.М. [41, 63].

Швидкість переміщення матеріалу вздовж плоского решета у режимі ковзання визначається залежністю:

$$v_{mat} = A \cdot \omega (\sin \alpha - f \cos \alpha) \cdot \frac{2}{\pi}, \quad (1.4)$$

де A – амплітуда коливань;

f – коефіцієнт тертя зернового матеріалу по робочій поверхні решета;

α – кут нахилу решета.

Час перебування зернового матеріалу на решеті під час його очищення, який і визначає можливість контакту частки із отвором знаходиться за формулою:

$$t = \frac{L}{v_{mat}}, \quad (1.5)$$

де L – довжина решета, м.

Час перебування зернового матеріалу на решеті прямо визначає ймовірність проходження прохідних часток через отвори: чим більший t , тим вища ймовірність сепарації. Це формує фундаментальне протиріччя: збільшення продуктивності вимагає скорочення t , тоді як якість очищення вимагає його збільшення.

Для вібровідцентрових решіт Тіщенко Л.М. [41] теоретично та експериментально довів, що підвищення частоти від 300...350 колив/хв до 450...550 колив/хв при одночасному зменшенні амплітуди від 10...12 мм до 4...6 мм дозволяє підвищити питому продуктивність при первинному очищенні пшениці на 25...35% без зниження ефекту очистки. Фізичний механізм полягає

у зростанні віброгустини матеріалу, що забезпечує більш ефективну вертикальну сегрегацію дрібних часток.

Котов Б.І., Степаненко С.П. [68] узагальнили результати досліджень і запропонували залежність для розрахунку оптимальних кінематичних параметрів зерноочисного решета, виходячи з умов максимальної ефективності сепарації:

$$a_{opt} = \frac{g \cdot (f \cos \alpha + \sin \varepsilon)}{\left(2 \cdot \pi \cdot n_{opt} / 60\right)^2}, \quad (1.6)$$

де n_{opt} – оптимальна частота коливань решета;

α – кут нахилу решета.

Польські дослідники Remigiusz Modrzewski, Andrzej Obraniak, Adam Rylski and Krzysztof Siczek [69] дослідили двочастотні режими коливань, при яких до основної поздовжньої частоти додається надвисока частота малої амплітуди. Встановлено, що двочастотне збудження забезпечує підвищення ефективності решітного очищення на 8...14% порівняно з традиційним однократним, однак запропоноване технічне рішення значно ускладнює конструкцію приводу.

Li J., Webb C. та ін. [70] моделювали за допомогою числових методів (через DEM) вплив глибини шару матеріалу на ефективність просіювання крізь отвори решета. За результатами досліджень доведено, що зменшення глибини шару від 5 до 2 діаметрів зерна підвищує ефективність просіювання на 18...27%, але при цьому знижується продуктивність решітного очищення. Ця взаємозалежність є принциповою і визначає необхідність компромісних рішень при проектуванні решітних частин зерноочисних машин.

Суттєвою проблемою при практичному застосуванні в зерноочисних машинах підвищених частот коливань решітних станів є зростання

інтенсивності забивання отворів. Завгородній О.І. [61] встановив, що інтенсивність забивання пропорційна квадрату частоти коливань:

$$I_{зab} = k_1 \cdot n^2 \cdot W, \quad (1.7)$$

де k_1 – коефіцієнт пропорційності;

W – вологість матеріалу.

Встановлено, що при вологості $W > 18\%$ і частоті $n > 500$ колив/хв, ймовірність забивання отворів різко зростає.

1.3.3. Пристрої-активатори та сегрегатори: конструкції та ефективність

Котов Б.І., Степаненко С.П. та Калініченко Р.А. [68] теоретично обґрунтували взаємодію пасивних розпушувачів із віброзрідженим зерновим шаром. Пасивний розпушувач повинен встановлюється на відстані від поверхні решета, що відповідає умові:

$$h_p = (1,5 \dots 2,0) \cdot d_{зерна}. \quad (1.8)$$

За таких умов розпушувач ефективно контактує з верхніми шарами зернового матеріалу, не перешкоджаючи при цьому проходженню дрібних часток до отворів у нижніх шарах.

Степаненко С.П. у своїх дослідженнях [23] встановив залежність приросту ефективності ΔY від кількості активаторів-розпушувачів N_p на одиниці довжини решета:

$$\Delta Y = A \cdot \ln(1 + k_2 N_p) - B \cdot N_p^2, \quad (1.9)$$

де A , B , k_2 – емпіричні коефіцієнти.

Залежність показує наявність оптимальної кількості розпушувачів, при перевищенні якої ефективність починає знижуватись через збільшення опору переміщенню матеріалу.

Практичним недоліком розпушувачів є зменшення ефективної площі живого перерізу решета на 10...15% через перекривання частини отворів у нижньому положенні, а також збільшення неврівноваженої маси суміші під час очищення на 8...15%, що залежить від конструкції та режимів роботи решітного стану [71-73].

Guerreiro F. та співавтори з Бразилії [74] провели дослідження ефективності різних конструкцій пристроїв-активаторів у порівнянні зі стандартними решетами для рапсу, встановивши, що гумові кульки, які використовують багато виробників, в тому числі і «BÜHLER», підвищують ефективність просіювання прохідних часток на 9...16% порівняно з решетами без очисних пристроїв при вологості матеріалу понад 15%.

1.3.4. Комбіновані та нетрадиційні кінематичні схеми

Бакум М.В. та співавтори [75] запропонували надання решітному полотну під час роботи поперечних коливань поряд із традиційними поздовжніми. При певних співвідношеннях амплітуд і частот досягається активізація внутрішньосферних процесів у двох площинах одночасно.

Дослідниками встановлено співвідношення амплітуд коливань

$$\left(\frac{A_{\perp}}{A_{\parallel}} = 0,3 \dots 0,6 \right), \quad (1.10)$$

де A_{\perp} – амплітуда коливань у напрямку, перпендикулярному до поздовжньої вісі решета;

A_{\parallel} – амплітуда коливань у напрямку, що співпадає з поздовжньою віссю решета.

При цьому частоти коливань мають знаходитися в діапазоні:

$$\left(\begin{array}{l} n_{\perp} = 0,5 \dots 1,0 \\ n_{\parallel} \end{array} \right), \quad (1.11)$$

де n_{\perp} – частота коливань у напрямку, перпендикулярному до поздовжньої вісі решета;

n_{\parallel} – частота коливань у напрямку, що співпадає з поздовжньою віссю решета.

Результати показали приріст ефективності на 12...18% при первинному очищенні пшениці. Однак конструкція приводу з двома ступенями свободи є складнішою і менш надійною для умов виробничого застосування.

Польські дослідники Frączek J., Recaław T. [76] дослідили вплив еліптичних траєкторій коливань на ефективність розподілення матеріалу за шириною решета. Встановлено, що при відношенні великої до малої напівосі еліпсу матеріал більш рівномірно розподіляється впоперек решета, що підвищує ефективність очищення зерноsumіші на 6...12% без збільшення питомої подачі. Важливим є те, що еліптичні траєкторії можна реалізувати без принципівих змін у конструкцію механізму приводу, виключно за рахунок регулювання ексцентриситету кривошипно-шатуного механізму приводу решіт.

Дослідники, що займалися вивченням зернозбиральних комбайнів [77, 78] підтвердили, що на комбайнах при роботі на схилах класичні решітні конструкції значно втрачають ефективність при кутах нахилу, що перевищують 5°, оскільки нахил змінює розподіл зернового матеріалу по поверхні решета і порушує умови повітряно-решітного очищення. Цей факт є важливим підґрунтям для обґрунтування необхідності вдосконалення геометрії самого решітного полотна, а не лише кінематичних параметрів його руху.

1.3.5. Вдосконалення геометрії робочої поверхні решіт

Харченко С.О. та Бакум М. В. розробили і захистили патентами [79, 80] рішення з оригінальними виштамповками та вирізами-канавками на поверхні решітного полотна. Розрахунок, проведений зазначеними дослідниками підтвердив, що при оптимальних розмірах канавок і їх правильній орієнтації відносно напрямку коливань частки, що знаходяться над поздовжніми перетинками, зміщуються до отворів за рахунок горизонтальної складової сили реакції профільованої поверхні.

Тіщенко Л.М., Ольшанський В.П. із співавторами [81] провели числове моделювання динаміки зернової суміші на рифленому решеті, яке підтвердило зростання поперечних переміщень часток на 30...45% порівняно з гладким решетом.

Васильковський О.М. зі співавторами [38] розробили концепцію «ідеального» решета зернового сепаратора, основним принципом якої є необхідність максимізації коефіцієнта живого перерізу (до 60...80%) та забезпечення нестійкої рівноваги часток на перетинках, що примушує їх активно переміщуватись до отворів. Зазначена концепція знайшла реалізацію у струнних та пруткових решетах [82-85]. Мороз С.М., Васильковський М.І. та Васильковський О.М. [86] обґрунтували оптимальні діаметри стрижнів пруткового решета d_s з умови забезпечення нестійкої рівноваги зернівки:

$$d_s \leq \frac{b_{\text{зерн}}}{2} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{b_{\text{отв}}}{b_{\text{зерн}}} \right)^2} \right), \quad (1.12)$$

де $b_{\text{зерн}}$ – ширина зернівки;

$b_{\text{отв}}$ – ширина отвору.

Попри високу ефективність запропонованої концепції, на сьогоднішній день використання струнних сепараторів не знайшло широкого використання.

Це пов'язано, у першу чергу, зі значною конструктивною складністю таких механізмів, яка полягає у необхідності забезпечення високої міцності, жорсткості і зносостійкості струн. При цьому інженерне питання забезпечення і контролю їх натягу у господарських умовах також є невирішеним.

Зарубіжні дослідники [87, 88, 89] за допомогою DEM-моделювання встановили, що при нерівномірному живленні решета збільшення горизонтального кута нахилу поверхні суттєво підвищує розсіювання матеріалу по ширині, що покращує рівномірність навантаження і загальну ефективність просіювання. Цей результат теоретично підтверджує перспективність будь-яких рішень, що збільшують поперечне переміщення часток по решітній поверхні.

1.4. Аналіз досліджень в напрямку встановлення раціональних параметрів і режимів роботи решітного очищення

1.4.1. Дослідження ймовірнісних моделей просіювання

Фундаментальним підходом до аналізу ефективності решітної сепарації є теорія ймовірності проходження часток через отвори [90]. Ймовірність одиночного контакту частинки з отвором може визначатися виразом:

$$P_1 = \frac{F_{отв}}{F_{кр}}, \quad (1.13)$$

де $F_{отв}$ – сумарна площа отворів решета;

$F_{кр}$ – площа, що припадає на один отвір решета (крок у поздовжньому і поперечному напрямках).

Загальна ймовірність проходження частки крізь отвори за час t її перебування на решеті складає:

$$P = 1 - (1 - P_1)^{N_k}, \quad (1.14)$$

де N_k – кількість контактів частинки з поверхнею решета за час t .

Li Z. та Tong X. [91] розвинули цей підхід, побудувавши детальну DEM-модель процесу проникнення частки через отвори. Авторами встановлено, що ймовірність залежить не тільки від геометрії, але й від швидкості руху частки відносно решета і кута, під яким ця частка наближається до отвору:

$$P_1 = f\left(\frac{b_q}{b_{отв}}, \frac{v_{верт}}{v_{попер}}, \theta\right), \quad (1.15)$$

де b_q – розмір частинки;

$b_{отв}$ – розмір отвору решета;

$v_{верт}$, $v_{попер}$ – вертикальна і поперечна складові швидкості;

θ – кут між віссю частинки та віссю отвору.

Дослідники в роботі [27] побудували математичну модель кінетики сепарації зернових матеріалів на багатоярусних решітних класифікаторах, базуючись на теорії Марківських процесів, та сформулювали задачу оптимізації у багатокритеріальній постановці, де критеріями є продуктивність і ефективність сепарації.

1.4.2. DEM-дослідження динаміки часток на решітній поверхні

Wang G., Tong X. [89, 91] за допомогою 3D DEM-моделювання дослідили зв'язок між вібраційними параметрами та ефективністю просіювання. Встановлено, що максимум ефективності досягається при кінематичному показнику $K_{отм} = 2,0 \dots 3,0$ для зернових матеріалів, що підтверджується дослідженнями Тіщенка Л.М. [41], про які сказано вище. За умови, якщо $K > 3,5$ буде спостерігатися «перестрибування» частинок зерноsumіші через отвори, що забезпечуватиме зниження ефекту очистки.

Cleary P.W. [87, 88] розробив масштабні промислові DEM-моделі для зернових матеріалів різних форм. Головний результат досліджень полягає в наступному – несферична форма зернівок (характерна для злакових) призводить до того, що ймовірність проходження через отвори у 1,5...2,5 рази нижча порівняно зі сферичними частинками тих самих лінійних розмірів. Тому реальні моделі мають використовувати коефіцієнт форми.

Дослідження впливу розподілу матеріалу на поверхні решета [92] дозволили встановити, що нерівномірне живлення суттєво погіршує ефективність просіювання, проте збільшення горизонтального кута нахилу дозволяє компенсувати цей недолік через прискорення просіювання частинок за шириною решета.

Xin Feng. [93] розробив модель поведінки зернівок кукурудзи при її проходженні крізь отвори, яка вперше врахувала орієнтацію частинки відносно отвору в момент контакту. Встановлено, що для продовговуватих (несферичних) частинок основною умовою проходження є орієнтація подовженої осі відносно вісі отвору. Діапазон значень ймовірності проходження для нерегулярно орієнтованих частинок досягає 3...4 разів.

1.4.3. Дослідження оптимізації конструктивних параметрів

Sokudlor N., Laloop K. та ін. [94] застосували методологію поверхні відгуку (RSM, Box-Behnken design) для оптимізації параметрів циліндричного зернового сепаратора при очищенні рису. Оптиміальні параметри, отримані методом RSM, забезпечили ефективність сортування 97,29% при мінімальних втратах 0,42%. Слід відмітити, що застосована методологія аналогічна центральному композиційному плануванню, що використовується у вітчизняних дослідженнях решітних частин ЗОМ. Аналіз показав, що за умови якщо кут нахилу решета 2° , визначене положення кута лотка та тривалість 120 с забезпечили мінімальні втрати та максимальну ефективність, а результати валідаційних експериментів підтвердили відповідність прогнозованим значенням.

Вітчизняний дослідник Ольшанський В.П. [58] аналітично дослідив рух неоднорідної дрібнозернистої суміші по плоскому віброрешету. Отримано залежність середньої швидкості руху матеріалу від параметрів решета у наступному вигляді:

$$v_{cp} = k_v \cdot A \cdot \sin \alpha \cdot \sqrt{n}, \quad (1.16)$$

де k_v – коефіцієнт швидкості (кінематичний коефіцієнт). Це безрозмірна величина або емпіричний показник, який враховує фізико-механічні властивості суміші (тертя, вологість, щільність) та особливості взаємодії частинок із поверхнею;

A – амплітуда коливань решета;

α – кут нахилу решета до горизонту;

n – частота коливань решета.

Формула (1.16) підтверджує, що для збільшення продуктивності (швидкості подачі) необхідно збільшувати або амплітуду коливань A , або частоту n , проте вплив частоти є менш інтенсивним через корінь квадратний у наведеній моделі. Результати порівняння отриманої моделі з експериментом показали задовільний збіг (відхилення не перевищує 12%).

Академік НААН України Тіщенко Л.М. [95] систематизував конструкції сепараторів для важкорозділюваних зернових сумішей – зернових матеріалів, компоненти яких є близькими за геометричними розмірами. Для таких матеріалів традиційні решітні сепаратори мають ефективність лише 40...55%, що зумовлює необхідність пошуку нових підходів до загальної інтенсифікації процесу сепарації, яких можна досягти шляхом створення оригінальних або поєднання існуючих конструкцій робочих органів, використання принципово нових способів розділення на основі вивчення відмінностей у фізико-механічних і механіко-технологічних властивостях зернових матеріалів, що підлягають обробці.

Lawinska K. та Modrzewski R. [96] провели систематичне дослідження блокування отворів решіт. Встановлено, що найбільш інтенсивно блокуються отвори частинками розміром $0,7 \leq \frac{b_v}{b_{отв}} \leq 0,95$. Запропоновано математичну модель ступеня блокування у вигляді:

$$B(t) = B_{\max} (1 - e^{-\lambda t}), \quad (1.17)$$

де $B(t)$ – поточний ступінь блокування отворів решета у момент часу t .

Зазвичай виражається у відсотках або частках одиниці від загальної кількості отворів (або площі «живого перерізу»);

B_{\max} – максимально можливий (граничний) ступінь блокування. Це асимптотичне значення, яке показує, яка частина отворів буде забита при дуже тривалій роботі решета за даних умов. Воно залежить від гранулометричного складу суміші та форми часток;

λ – коефіцієнт інтенсивності блокування (або константа швидкості процесу).

Цей параметр об'єктивно визначає, наскільки швидко система досягає стану насичення (B_{\max}).

Згідно з дослідженнями [96], доведено, що процес блокування відбувається найбільш інтенсивно на початку роботи. З часом вільних отворів стає менше, а тому ймовірність потрапляння нової «критичної» частки в незайнятий отвір зменшується, і крива графіка $B(t)$ виходить на плато.

Це рівняння дозволяє прогнозувати час ефективної роботи решета до моменту, коли його просівна здатність впаде нижче критичного рівня і виникне потреба в очищенні. Встановлено, що за умови підвищення частоти коливань від 300 до 500 коливань/хв має місце зниження коефіцієнта інтенсивності блокування λ , що сприяє зниженню схильності отворів до забивання.

Guerreiro F.S. та ін. [74] дослідили вплив вологості зернового матеріалу на ефективність просіювання. Встановлено, що при зростанні вологості від 12 до

18% ефективність зменшується у середньому на 15...22%, а інтенсивність блокування отворів зростає у 2...3 рази.

Це підкреслює актуальність розробки рішень, що знижують схильність отворів до забивання.

1.4.4. Дослідження теоретичних основ взаємодії часток із поверхнею решіт

Аналіз руху одиночної непрохідної частинки по похилому решеті є теоретичною основою для розуміння закономірностей переміщення зернового матеріалу. Для частки, що рухається по похилій поверхні, рівняння руху записується як:

$$m \frac{d^2 S}{dt^2} = mg \sin \alpha - mg \cos \alpha \cdot f - F_{on}, \quad (1.18)$$

де S – шлях, який проходить частка по робочій поверхні решета;

α – кут нахилу решета;

$f = \operatorname{tg} \varphi$ – коефіцієнт тертя ковзання;

F_{on} – сила опору шару матеріалу.

Дана залежність є базовою і відправною точкою для аналізу поведінки частинок на решітній поверхні, що має отвори будь-яких форм. Зарубіжні дослідники підкреслюють, що товщина шару матеріалу на решеті може перевищувати товщину зернівок у кілька разів. Основною умовою проходження дрібних часток крізь отвори є попередня стратифікація шару, яка вимагає значного збільшення кінематичного показника і/або швидкості повітряного потоку.

Степаненко С.П. та Котов Б.І. [97] виконали теоретичне дослідження процесу сепарації зернових сумішей з урахуванням розподілу часток за розмірами. Встановлено, що вихід прохідної фракції вздовж решета описується диференціальним рівнянням першого порядку:

$$\frac{dq(x)}{dx} = -\lambda(x) \cdot q(x), \quad (1.19)$$

де $q(x)$ – питомий вміст прохідних часток на відстані x від початку решета;

$\lambda(x)$ – локальний коефіцієнт інтенсивності сепарації, що залежить від товщини шару і кінематичних параметрів.

Якщо розв'язати рівняння (1.19), за умови, що $\lambda = const$, отримаємо:

$$q(x) = q_0 \cdot e^{-\lambda x}. \quad (1.20)$$

Таким чином, ефективність сепарації дорівнює:

$$Y = 1 - \frac{q(L)}{q_0} = 1 - e^{-\lambda L}. \quad (1.21)$$

Остання залежність (1.21) дозволяє оцінити необхідну довжину решета для досягнення заданого рівня ефективності при відомому коефіцієнт інтенсивності сепарації λ .

Висновки до першого розділу та задачі досліджень

Проведений аналіз стану техніки та досліджень у сфері решітного очищення зерна дозволяє сформулювати наступні висновки:

1. Решітна сепарація залишається основним і найбільш дієвим технологічним методом очищення зернових матеріалів, як окремо, так у поєднанні із іншими способами розділення компонентів зернової суміші. Незважаючи на різноманітність конструктивних рішень і значний обсяг досліджень, питома продуктивність і ефективність роботи плоских

коливальних решіт серійних зерноочисних агрегатів залишаються значно нижчими від теоретично можливих.

2. Підвищення частоти коливань (перший спосіб інтенсифікації роботи решітного очищення) обмежується прогресуючим забиванням отворів та зростаючим травмуванням зерна. Пристрої-активатори (другий спосіб) ускладнюють конструкцію і зменшують корисну площу решета. Комбіновані кінематичні схеми (третій спосіб) вимагають складного і ненадійного приводу. Профільовані поверхні (четвертий спосіб) потребують прецизійного виробничого обладнання і не мають підтверджених даних щодо довговічності. Струнні решета (п'ятий спосіб) є технологічно складними у серійному виробництві.
3. Аналіз зарубіжних і вітчизняних досліджень дозволяє підтвердити, що найбільш перспективним є напрямок вдосконалення геометрії самого решітного полотна без принципових змін кінематики приводу: саме такі рішення поєднують технологічну простоту реалізації з реальним підвищенням ефективності через активізацію поперечних внутрішньосферних переміщень часток.
4. Вивчення способів інтенсифікації процесу сепарації дозволило встановити, що поперечне переміщення часток у зерновому шарі є важливим, але недостатньо задіяним резервом підвищення ефективності решітної сепарації в традиційних конструкціях зерноочисних агрегатів.
5. Плоске коливальне решето з зигзагоподібним розміщенням продовговатих отворів є перспективним та технологічно простим рішенням для інтенсифікації процесу решітного очищення зерна. Відхилення осей отворів від поздовжньої осі решета на кут β повинно забезпечити одночасну активізацію поздовжніх та поперечних внутрішньосферних процесів без ускладнення конструкції самої машини.

Важливо, що запропонована конструкція робочої поверхні решета задовольняє всім вимогам до практичного використання, зокрема:

- реалізується у вигляді простого штампованого або лазерно-різаного решітного полотна;
- не потребує жодних змін у приводі та кінематиці решітного стану;
- не ускладнює технічне обслуговування зерноочисного обладнання;
- дозволяє легко замінювати базове на модернізоване решітне полотно у наявних зерноочисних машинах.

Разом із тим, конструктивні параметри (раціональні значення кута відхилення отворів β , розміри отворів, коефіцієнт живого перерізу, схема чергування кутів відхилення за шириною і довжиною решета) та раціональні режими роботи (питома подача, частота і амплітуда коливань) для решіт із зигзагоподібним розміщенням отворів наразі не є встановленими і обґрунтованими. Відсутні математичні моделі, що враховують специфіку руху часток на зигзагоподібній поверхні. Не проведено систематичних порівняльних досліджень з традиційними конструкціями в ідентичних умовах. Не обґрунтовані умови забезпечення транспортуючої здатності решета при різних значеннях кута β . Не вивчено поведінку даної конструкції при роботі з матеріалами підвищеної вологості та засміченості.

Отже, зазначена конструкція потребує всебічного теоретичного та експериментального вивчення, що і визначає актуальність і предмет цієї дисертаційної роботи.

Об'єктом досліджень є процес решітної сепарації зернових матеріалів на плоскому коливальному решеті із зигзагоподібним розміщенням продовговатих отворів у складі зерноочисної машини загального призначення.

Предметом досліджень є закономірності впливу конструктивних параметрів (кут відхилення осей отворів β , розміри та форма отворів, схема їх розміщення, коефіцієнт живого перерізу) і технологічних режимів роботи (питома подача матеріалу, частота та амплітуда коливань) на ефективність очищення зернового вороху та питому продуктивність решітних поверхонь із зигзагоподібним розміщенням отворів.

На підставі наведених висновків при виконанні подальших досліджень підлягають вирішенню наступні задачі:

1. Провести теоретичне виявлення технологічних ефектів від використання решета із зигзагоподібно розташованими отворами.
2. Здійснити теоретичний аналіз закономірностей руху часток зернового матеріалу по похилій решітній поверхні із зигзагоподібно розміщеними отворами з урахуванням сили опору шару матеріалу та отримати аналітичні моделі.
3. Розробити та виготовити дослідні зразки решітних полотен із різними кутами відхилення осей отворів від поздовжньої осі решета; обґрунтувати та розробити методикау їх лабораторного дослідження.
4. Встановити методом повного факторного експерименту кількісні залежності ефективності очищення зернового вороху від питомої подачі, частоти коливань та кута відхилення осей отворів; отримати адекватну математичну модель процесу сепарації.
5. Визначити раціональні конструкційні параметри та технологічні режими роботи решіт із зигзагоподібним розміщенням отворів для зерна пшениці, що забезпечують максимальну ефективність очищення при заданій продуктивності.
6. Провести порівняльні випробування ефективності роботи решіт із зигзагоподібним розміщенням отворів та традиційних конструкцій з паралельним розміщенням в ідентичних умовах роботи.
7. Вивчити вплив фізико-механічних властивостей зернового матеріалу (вологість, рівень засміченості, культура) на ефективність роботи модернізованих решіт.
8. Дати техніко-економічну оцінку доцільності впровадження розробленої конструкції решіт у зерноочисні машини загального призначення.

РОЗДІЛ II

ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПЛОСКОГО РЕШЕТА

2.1. Аналіз ймовірності просіювання прохідних часток крізь отвори решета

Розглянемо класичне плоске пробивне решето з продовгуватими отворами, вісь яких збігається з поздовжньою віссю решета і, відповідно, з напрямом коливань (рис. 2.1). Отвори решета розділені поздовжніми і поперечними перетинками, розміри яких (особливо поздовжніх) суттєво впливають на ймовірність потрапляння прохідних часток в площину отворів.

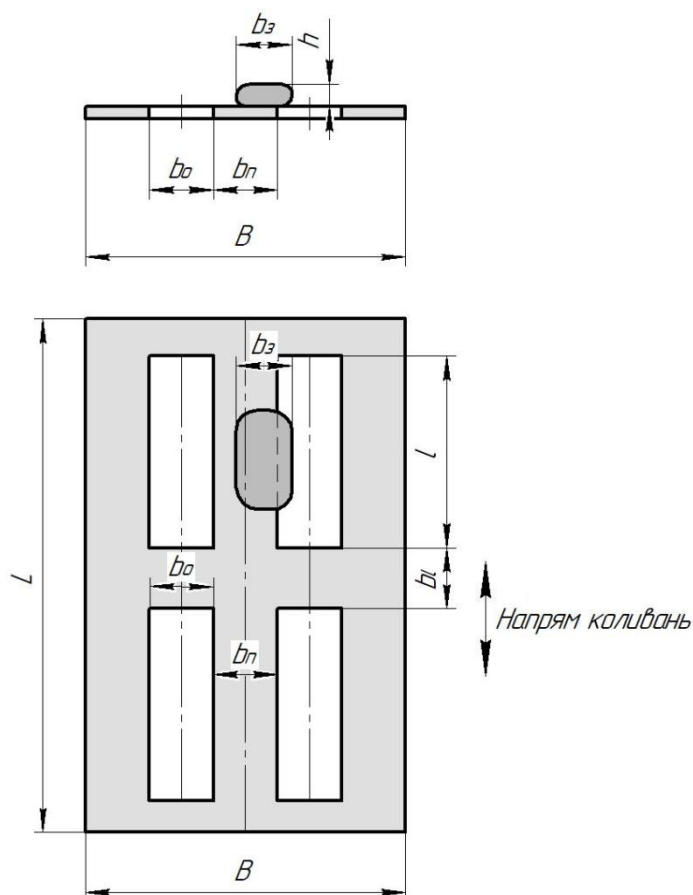


Рис. 2.1. Схема до визначення ймовірності потрапляння прохідних часток в площину отворів класичного решета

Зменшення ширини поздовжніх перетинок, як видно з праць [38, 90, 98] значно збільшує ймовірність потрапляння прохідних часток в площину отворів

за рахунок збільшення «живого» перерізу решета і створення умов їх нестійкої рівноваги на перетинках відносно отворів. Однак суттєво зменшити ширину перетинок b_n і b_l серійних класичних пробивних решіт надто складно, причому як технічно, так і технологічно. Тому пошук ефективного рішення має базуватися на використанні інших способів забезпечення швидкої орієнтації часток відносно отворів решета.

Проведений аналіз конструкційних особливостей плоскорешітних коливальних сепараторів дозволив виявити особливість, яка сумісно з відносно великими значеннями ширин перетинок, є причиною низької інтенсивності орієнтації часток відносно отворів. Очевидним є те, що в разі співпадіння напрямів осей розташування отворів і технологічного руху часток вздовж решета, ймовірність їх поперечного переміщення виявляється надто низькою, що робить частки, які знаходяться на поздовжніх перетинках (не у площині отворів), достатньо стабільними, просторово зрівноваженими. Таким чином, потрапляння прохідних часток до отворів може не відбутися, навіть на всій довжині решета, що в результаті знижує ефективність розділення.

На основі зазначеного вище, можна сформулювати робочу гіпотезу: підвищення ймовірності потрапляння прохідних часток в площину отворів, а значить і ефективності решітної сепарації зерна можна досягти шляхом забезпечення різнонаправленості напряму розташування осей отворів решета та напряму технологічного руху зернової маси.

Технологічний напрям руху зернової маси забезпечується поздовжнім і поперечним кутом встановлення решета та напрямом коливань.

Поздовжній кут встановлення решіт становить $5-15^\circ$ і практично не впливає на поперечне переміщення часток. У поперечній площині решета встановлюють під кутом 0° (горизонтально), що обумовлено необхідністю забезпечення рівномірного завантаження сепаруючої поверхні. Зміна цього кута призведе до перевантаженості опущеної і недовантаженості піднятої сторін решітної поверхні, що негативно вплине на якість сепарації. При зміні

напряму коливань (відхилення у бік поперечного) призведе до аналогічного ефекту.

Таким чином, єдиною доступною можливістю забезпечення різнонаправленості напряму розташування осей отворів решета та напряму технологічного руху зернової маси без застосування додаткових пристроїв, є виготовлення отворів, вісі яких розташовані під деяким кутом до вісі решета. Для уникнення виникнення негативного ефекту одностороннього (діагонального) технологічного переміщення зернової маси, отвори решета доцільно виготовлювати, по чергово змінюючи кути, забезпечивши зигзагоподібне розташування на площині (рис. 2.2).

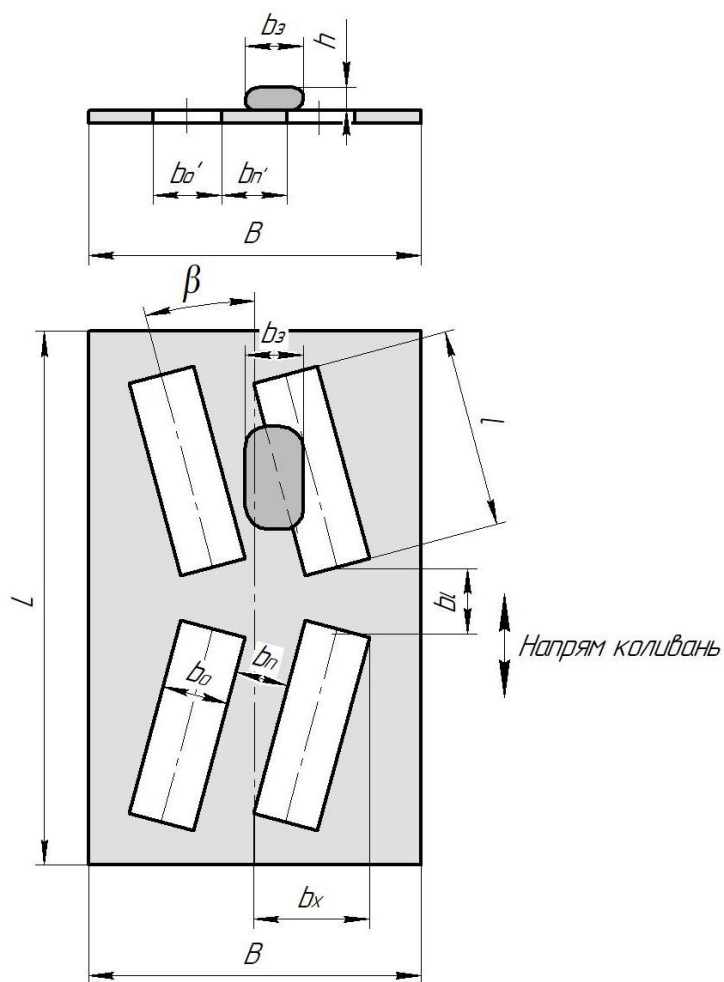


Рис. 2.2. Схема до визначення ймовірності потрапляння прохідних часток в площину отворів решета із зигзагоподібно розташованими отворами

Запропоноване решето із зигзагоподібно розташованими отворами є різновидом плоского грохота, робоча поверхня якого містить продовгуваті отвори, орієнтовані під кутом β до поздовжньої вісі руху матеріалу. Таке конструктивне рішення суттєво впливає на ефективність розділення плоских часток, оскільки змінює геометричне співвідношення між розмірами отворів і траєкторією руху частки.

Для теоретичної перевірки гіпотези щодо ефективності даного рішення проведемо теоретичний аналіз, змодельовавши процес. Використовуючи абстрагування приймемо наступні вихідні дані: плоскі частки шириною $b_3=2,0$ мм просіюються через решето з прямокутними отворами довжиною $l=25$ мм, шириною $b_0=2$ мм, розділеними поперечними та поздовжніми перетинками шириною, відповідно b_n і b_l . Розділення здійснюється за ознакою «товщина» h , яка завжди є меншою за ширину, тому частка шириною $b_3=2,0$ мм однозначно є прохідною.

Умовою просіювання плоскої частки, при скомпенсованості інших сил, є потрапляння центру ваги у площину отвору. У цьому випадку рівнодіюча реакції опори зникає, і під дією сили тяжіння частка перекидається у отвір.

Отже, задача визначення ймовірності потрапляння прохідних часток в площину отворів решета зводиться до геометричної задачі.

При класичному (рис. 2.1) розташуванні отворів паралельно поздовжній осі решета ($\beta = 0^\circ$) частка рухається здовж решета. У поздовжньому напрямку частка неодмінно перетне багато отворів, тому поздовжня ймовірність наближається до одиниці. Реальним обмежуючим фактором є поперечне розташування центру ваги відносно чергування отворів і перетинок.

Загальну ймовірність потрапляння прохідних часток в площину отворів решета визначають як добуток ймовірностей:

$$P = P_x \cdot P_y, \quad (2.1)$$

де P_x – ймовірність потрапляння прохідних часток в площину отворів решета у поперечному напрямку,

P_y – ймовірність потрапляння прохідних часток в площину отворів решета у поздовжньому напрямку.

Ймовірність потрапляння прохідних часток в площину отворів решета у поперечному напрямку визначається як відношення ширини отвору до поперечного кроку решета:

$$P_x = \frac{b_0}{b_0 + b_n}. \quad (2.2)$$

Ймовірність потрапляння прохідних часток в площину отворів решета у поздовжньому напрямку:

$$P_y = \frac{l}{l + b_l}. \quad (2.3)$$

Таким чином, загальна ймовірність потрапляння прохідних часток в площину отворів решета розраховується як

$$P = \frac{b_0}{b_0 + b_n} \cdot \frac{l}{l + b_l}. \quad (2.4)$$

Залежність загальної ймовірності потрапляння прохідних часток в площину отворів решета для можливих значень ширин поперечних і поздовжніх перетинок наведено на рис. 2.3.

Як видно з графіку (рис. 2.3), навіть при мінімальних значеннях ширини перетинок, ймовірність потрапляння часток в площину отворів решета є незначною, причому ця проблема особливої гостроти набуває при застосуванні підсвічних решіт, які мають мінімальні розміри робочих отворів.

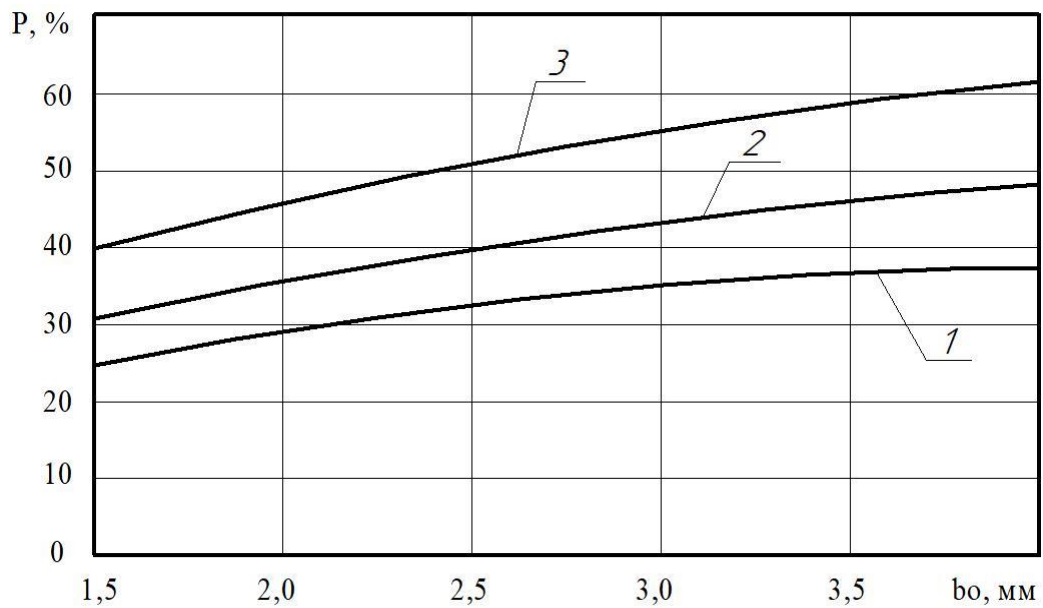


Рис. 2.3. Загальна ймовірність потрапляння прохідних часток в площину отворів від ширини отворів решета:

- 1 – для перетинок $b_n=b_l=4$ мм; 2 – для перетинок $b_n=b_l=3$ мм;
3 – для перетинок $b_n=b_l=2$ мм.

Проте слід підкреслити: теоретично частки, центр ваги яких точно збігається з проекцією перетинки, ніколи не просіюються у класичних решетах з кутом відхилення отворів $\beta=0^\circ$, оскільки вони рухаються вздовж усього решета над «мертвою зоною». Таким чином, ефективна ймовірність при прямих отворах визначається співвідношенням (2.2) і ненабагато відрізняється від загальної, оскільки ймовірність потрапляння прохідних часток в площину отворів решета у поздовжньому напрямку складає понад 90%.

При повороті отворів на кут β відносно поздовжньої вісі решета, його проекція на поперечну вісь збільшується, а значить і збільшується поперечна ймовірність потрапляння частки в площину отвору.

Повна поперечна проекція повернутого отвору b_{ox} визначається геометрично як сума проекцій сторін прямокутника (рис. 2.2):

$$b_x = l \cdot \sin \beta + b \cdot \cos \beta. \quad (2.5)$$

Таким чином, ймовірність потрапляння частки в площину отвору, розташованого під кутом до вісі решета визначиться як

$$P_x = \frac{b_x}{b_o + b_n}. \quad (2.6)$$

Підставивши значення чисельника, отримаємо

$$P_x = \frac{l \cdot \sin \beta + b_o \cdot \cos \beta}{b_o + b_n}. \quad (2.7)$$

Побудувавши залежність ймовірності потрапляння частки в площину отвору, розташованого під кутом до вісі решета (рис. 2.4), можна оцінити вплив основних складових рівняння на процес.

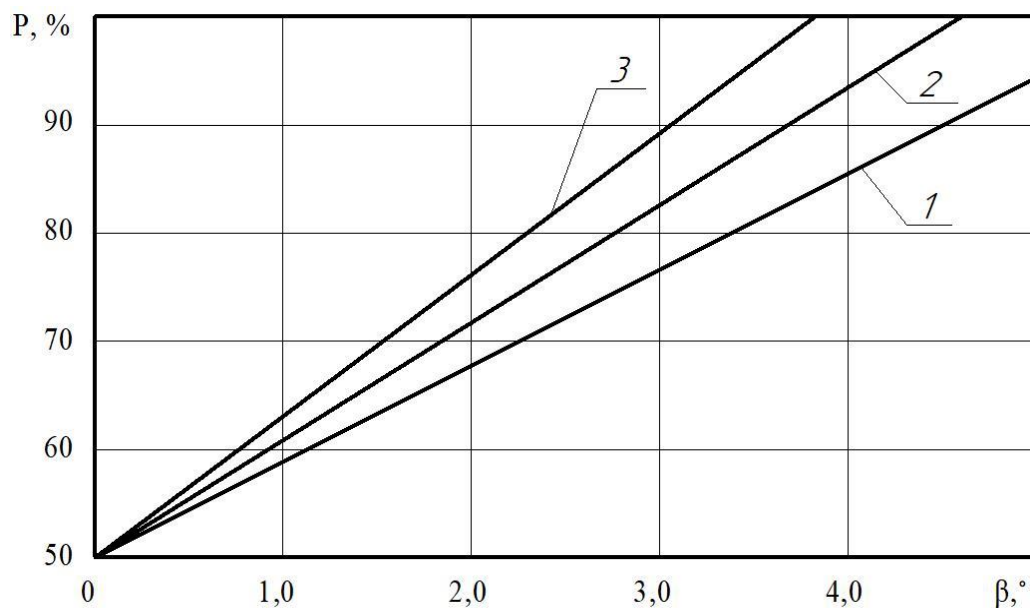


Рис. 2.4. Ймовірність потрапляння прохідних часток в площину отворів від кута нахилу отворів відносно вісі решета:

- 1 – для довжини отворів $l=20$ мм; 2 – для довжини отворів $l=25$ мм;
3 – для довжини отворів $l=30$ мм.

Аналіз отриманих результатів говорить про те, що фізичною умовою забезпечення гарантованого потрапляння частки в площину отвору ($P_x = 1$) є:

$$l \cdot \sin \beta + b_o \cdot \cos \beta \geq b_o + b_n. \quad (2.8)$$

Фізичний зміст результату: при критичному куті нахилу $\beta_{кр} \geq 4,6^\circ$ і довжині отворів $l=25$ мм поперечна проекція кожного отвору стає не меншою за їх крок на решеті. При цьому проекції сусідніх отворів перекриваються і «мертві зони» повністю зникають. Жодна траєкторія поздовжнього технологічного руху пласкої частки по поверхні решета не може оминати отворів, що є підтвердженням висунутої нами гіпотези.

Таким чином встановлено, що при $\beta = 0^\circ$ (класичне плоске пробивне решето) ймовірність просіювання становить 50 %, що є теоретичним мінімумом для даного типу решіт, коли друга частка рухається над перетинками і не має можливості потрапити в зону просіювання. Збільшення кута нахилу β від 0° до $\beta_{кр} = 4,6^\circ$ (при стандартній довжині отворів $l=25$ мм) забезпечує зростання ймовірності від 50 % до 100 % за рахунок скорочення «мертвих зон». При цьому при $\beta \geq \beta_{кр}$ процес просіювання набуває детермінованого характеру: кожна пласка частка гарантовано потрапляє у площину отвору і має змогу просіятися.

Певного впливу на ймовірність потрапляння частки в площину отворів, окрім кута, має також їх довжина. Збільшення довжини отворів зменшує потрібний кут їх відхилення від вісі решета.

2.2. Детермінований аналіз технологічного ефекту від руху матеріалу по решету із зигзаговидно розташованими отворами

Розглянемо характер взаємодії зернового матеріалу з робочою поверхнею похилого решета, отвори якого мають зигзагоподібне прямокутне розташування відповідно до патентного рішення [99]. Попередній етап

експериментальної перевірки підтвердив функціональність запропонованої конструкції та засвідчив зростання показників ефективності процесу сепарації [100].

З точки зору фракційного складу, зерновий ворох, що надходить на решето, містить дві категорії часток – прохідні та непрохідні, при цьому частка прохідних компонентів, товщина яких не перевищує ширину отворів, суттєво поступається кількості непрохідних. Відповідно до наявних літературних джерел [1, 3, 4], масова частка прохідних компонентів у зерновому вороху після обмолоту не перевищує 15%, а при використанні сучасної добре налаштованої збиральної техніки цей показник може бути значно нижчим. Таким чином, наведене вище доводить доцільність зосередження уваги на закономірностях переміщення великих непрохідних часток по решітній поверхні, оскільки саме вони визначають загальну кінетику руху матеріалу.

Умови та вихідні дані для аналізу. Решето нахилено під кутом α до горизонтальної площини у поздовжньому напрямку. Прямокутні отвори орієнтовані зигзагоподібно під кутом $\pm \beta$ відносно поздовжньої осі. Рух часток по такому решету доцільно розглядати як послідовність п'яти характерних фаз (рис. 2.5), що циклічно повторюються.

Частки зернового матеріалу досягають сепарувальної поверхні з певною початковою швидкістю, вектор якої орієнтовано вздовж поздовжньої осі решета. На частку нижнього шару діє система сил:

- сила тяжіння $m \cdot g$, спрямована вертикально донизу;
- сила тертя F , що протидіє напрямку переміщення частки;
- сила опору шару F_w , яку при невеликих значеннях швидкості вважатимемо пропорційною їй, а вектор якої збігається з поздовжньою віссю решета;
- нормальна реакція опори N , перпендикулярна до площини решітної поверхні.

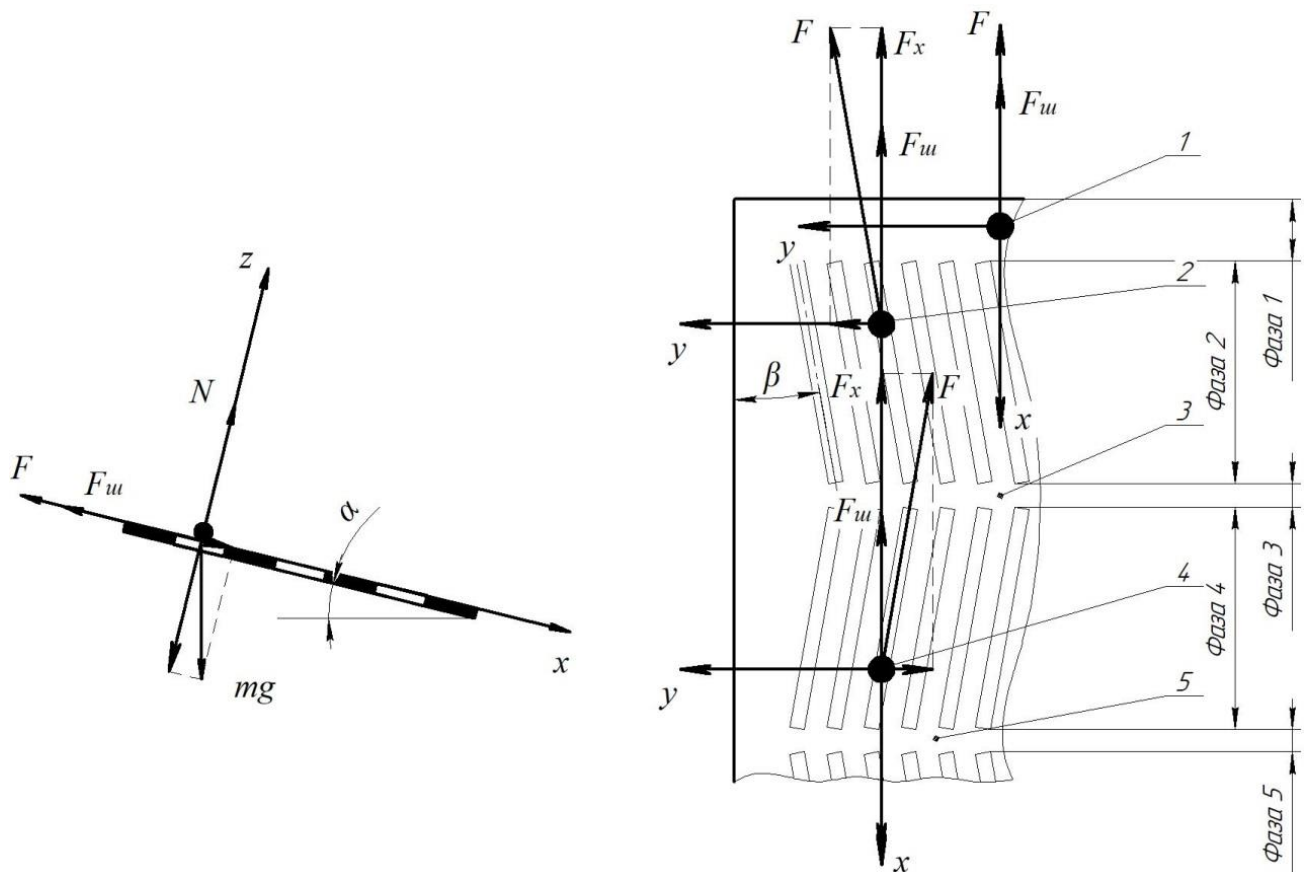


Рис. 2.5. Розрахункова схема руху непрохідної частки по решету із зигзагоподібно розташованими отворами

За результатами ранжування значущості чинників [100] прийнято ряд спрощень: вплив аеродинамічного опору знехтувано через його незначну роль у динаміці частки при малих швидкостях; коливання решета не розглядаються на даному етапі – їхній рушійний ефект у поздовжньому напрямку враховано через еквівалентне збільшення кута нахилу α .

Рівняння динаміки переміщення непрохідної частки вздовж прямокутного отвору решітної поверхні з урахуванням опору зернового шару має вигляд (рис. 2.5):

$$m \cdot \frac{dV}{dt} = m \cdot g \cdot \sin \alpha - F - F_u, \quad (2.9)$$

де α – кут поздовжнього нахилу решета, °;

F – сила тертя, Н;

F_{uu} – сила опору зернового шару, Н.

Сила тертя:

$$F = f \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta, \quad (2.10)$$

де f – коефіцієнт тертя частки по поверхні решета;

β – кут відхилення отворів від поздовжньої вісі решета, °.

Силу опору зернового шару при малих значеннях швидкості переміщення можна записати у вигляді

$$F_{uu} = k \cdot V, \quad (2.11)$$

де k – коефіцієнт опору зернового шару на частку, яка рухається здовж отвору, кг/с.

З урахуванням виразів (2.10) і (2.11), рівняння (2.9) матиме вигляд

$$m \cdot \frac{dV}{dt} = m \cdot g \cdot \sin \alpha - f \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta - k \cdot V. \quad (2.12)$$

Провівши спрощення рівняння отримаємо

$$\frac{dV}{dt} = g \cdot (\cos \alpha - \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \varphi \cdot \cos \beta) - \frac{k}{m} \cdot V, \quad (2.13)$$

де φ – кут тертя, °.

Проведемо заміну складових рівняння, прийнявши

$$g \cdot (\cos \alpha - \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \varphi \cdot \cos \beta) = H, \quad (2.14)$$

$$\frac{k}{m} = M . \quad (2.15)$$

Таким чином, рівняння (2.13) набуде вигляду, зручного для проведення інтегрування

$$\frac{dV}{dt} = H - M \cdot V . \quad (2.16)$$

Провівши інтегрування рівняння (2.16) і спростивши вираз отримаємо швидкість частки

$$V_v = V_0 \cdot e^{-B \cdot t} + \frac{H}{M} \cdot (1 - e^{-M \cdot t}) . \quad (2.17)$$

Для отримання зв'язку швидкості і переміщення, представимо швидкість частки як

$$V_v = \frac{dx}{dt} . \quad (2.18)$$

Похідну по часу запишемо як просторову похідну

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = V_v \cdot \frac{dV_v}{dx} . \quad (2.19)$$

Інтегруємо (2.18), підставляючи (2.17) при $V_0=0$

$$x = \int_0^t \frac{H}{M} \cdot (1 - e^{-B \cdot t}) dt . \quad (2.20)$$

Отримаємо

$$x = \frac{H}{M} \cdot t - \frac{H}{M^2} \cdot (1 - e^{-Mt}). \quad (2.21)$$

Оскільки

$$V_u = \frac{H}{M} \cdot (1 - e^{-Mt}),$$

то

$$x = \frac{H}{M} \cdot t - \frac{V_u}{M}. \quad (2.22)$$

На початку руху, коли $V_u \ll \frac{H}{M}$, другим доданком можна знехтувати:

$$x \approx \frac{H}{M} \cdot t \Rightarrow t \approx \frac{M \cdot x}{H}. \quad (2.23)$$

Тепер підставимо отримане значення часу до виразу (2.17) і отримаємо залежність швидкості руху частки від переміщення

$$V_u = \frac{H}{M} \cdot \left(1 - e^{-\frac{M^2 \cdot x}{H}} \right), \quad (2.24)$$

Або

$$V_u = \frac{m \cdot g \cdot (\cos \alpha - \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \varphi \cdot \cos \beta)}{k} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k^2 \cdot x}{m \cdot g \cdot (\cos \alpha - \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \varphi \cdot \cos \beta)}} \right). \quad (2.25)$$

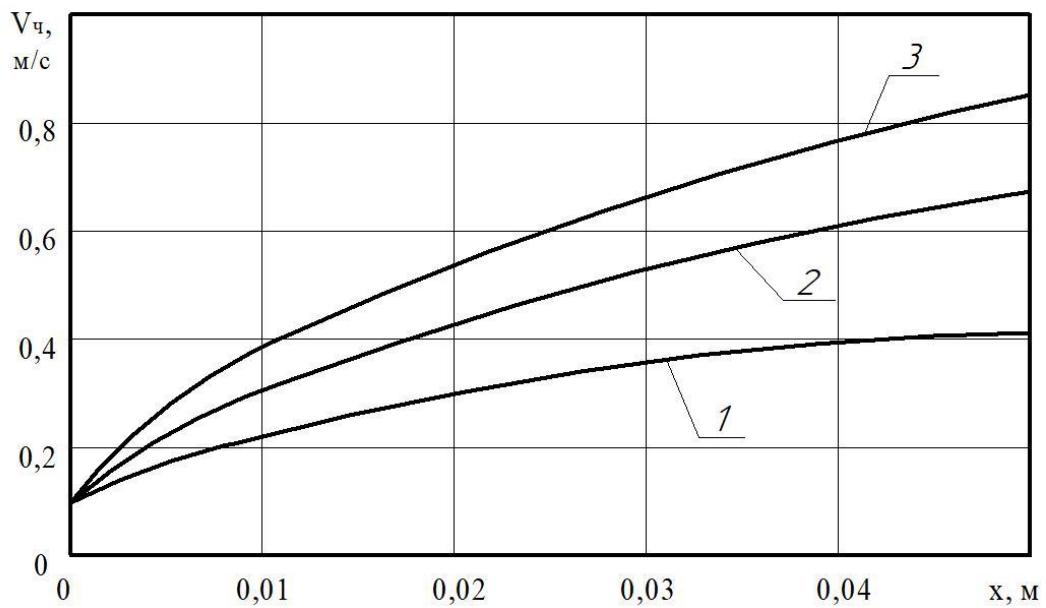


Рис. 2.6. Залежності швидкості від переміщення здовж отвору для різних кутів нахилу класичного решета з поздовжніми отворами ($\beta=0$):
 1 – кут решета $\alpha=30^\circ$; 2 – кут решета $\alpha=45^\circ$; 3 – кут решета $\alpha=60^\circ$.

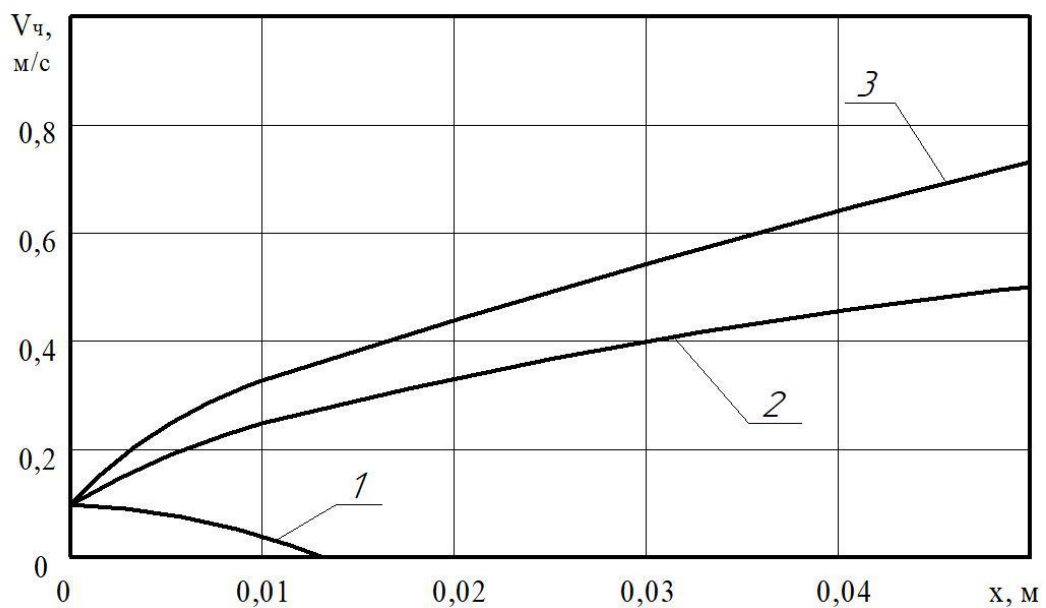


Рис. 2.7. Залежності швидкості від переміщення здовж отвору для різних кутів нахилу оригінального решета з кутом відхилення отворів від осі решета ($\beta=10^\circ$):
 1 – кут решета $\alpha=30^\circ$; 2 – кут решета $\alpha=45^\circ$; 3 – кут решета $\alpha=60^\circ$

Графічні залежності швидкості руху часток від переміщення по класичному і оригінальному решетах наведено, відповідно, на рис. 2.6, 2.7. Отримані дані не враховують впливу опору зернового шару ($k=0$), однак

свідчать про загальний технологічний ефект зниження швидкості переміщення часток за рахунок взаємодії з відхиленими від вісі отворів запропонованого решета, що разом із збільшенням ймовірності потрапляння часток у площину отвору, дозволить підвищити ефективність розділення.

2.3. Теоретичне дослідження переміщення зернової частки по поверхні решета із зигзагоподібними отворами, що здійснює коливання

2.3.1. Передумови та схема сил

Розглянемо рух непрохідної частки зернового матеріалу по похилій поверхні решета із зигзагоподібно розташованими прямокутними отворами, згідно рис. 2.5.

Об'єктивний аналіз процесу переміщення частки вимагає прикладення інерційної складової від коливання решета, тому до попередньої схеми введемо дію коливальника (рис. 2.8).

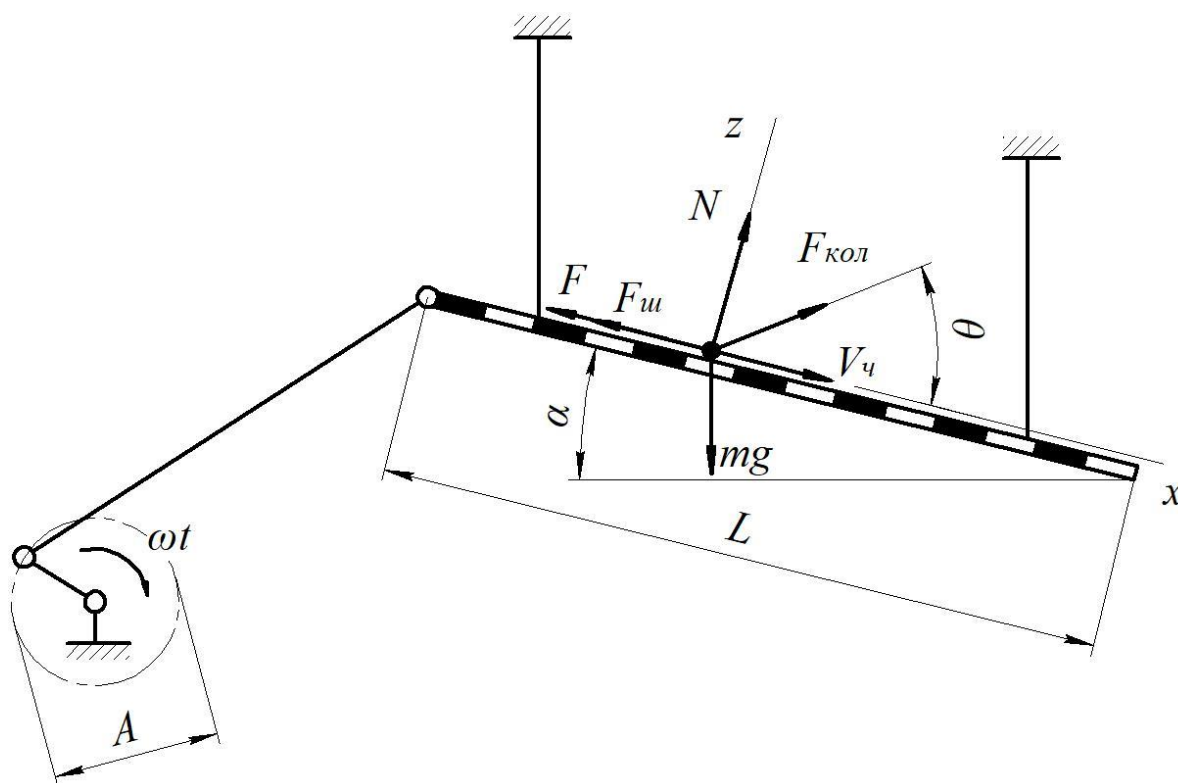


Рис. 2.8. Розрахункова схема коливального решета у площині xz

Таким чином, решето встановлено під кутом α до горизонтальної площини у поздовжньому напрямку здійснює коливання у площині xz за законом:

$$z = A \cdot \cos(\omega t), \quad (2.26)$$

де A – амплітуда коливань, м;

ω – кутова швидкість коливальника, рад/с;

t – час, с.

Отвори решета розташовані зигзагоподібно під кутом $\pm\beta$ відносно його поздовжньої вісі (рис. 2.5). Напрямок коливань утворює кут θ з поверхнею решета (рис. 2.8).

На непрохідну частку діють:

- сила тяжіння $m \cdot g$;
- сила нормальної реакції N ;
- сила інерції $F_{\text{кол}}$;
- сила тертя F ;
- сила опору шару $F_{\text{ш}}$.

2.3.2. Рівняння руху з урахуванням коливань решета

За наявності коливального руху, прискорення решета запишеться як

$$\ddot{z} = -A \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega t). \quad (2.27)$$

Вектор прискорення решета у проекції на вісь z :

$$\ddot{z}_z = -A \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega t) \cdot \sin \theta. \quad (2.28)$$

Вектор прискорення решета у проекції на вісь x :

$$\ddot{z}_x = -A \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos \theta. \quad (2.29)$$

Наявність прискорення від коливального руху обумовлює дію на частку інерційної сили $F_{кол}$, яка змінюється в часі і є основною відмінністю від процесу, розглянутого у п. 2.2, коли рушійною силою виступала лише сила гравітації частки, що знаходилася на похилій решітній площині зі значним кутом нахилу.

Диференціальне рівняння руху частки вздовж отвору решета (у проекції на вісь x), що здійснює коливання має вигляд:

$$m \cdot \dot{V}_q = m \cdot g_x - F - F_{ш} + F_{кол.x}. \quad (2.30)$$

Силу тертя визначають за виразом:

$$F = N \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (2.31)$$

де N – сила нормальної реакції, Н;

φ – кут тертя частки по решету, °.

Сила нормальної реакції змінюється в часі за рахунок змінної сили інерції:

$$N = m \cdot (g \cdot \cos \alpha - A \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega t) \cdot \sin \theta). \quad (2.32)$$

При русі решета донизу, реакція N зменшується, при русі вгору – зростає.

Граничною умовою відсутності відриву частки від решета (при $N = 0$) є

$$K = \frac{A \cdot \omega^2 \cdot \sin \theta}{g \cdot \cos \alpha} \leq 1. \quad (2.33)$$

Таким чином, силу тертя знайдемо за рівнянням

$$F = m \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \cos \beta \cdot (g \cdot \cos \alpha - A \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega t) \cdot \sin \theta). \quad (2.34)$$

Сила опору зернового шару визначена у (2.11).

Сила інерції від коливального руху решета:

$$F_{\text{кол.х}} = m \cdot \ddot{z}_x = -m \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega t) \cdot \sin \theta. \quad (2.35)$$

Таким чином, з урахуванням (2.34), (2.11) і (2.35), диференціальне рівняння руху частки вздовж отвору решета прийме вигляд

$$m \cdot \dot{V}_y = m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta - m \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \cos \beta \cdot (g \cdot \cos \alpha - A \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega t) \cdot \sin \theta) - k \cdot V_y - m \cdot A \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos \theta. \quad (2.36)$$

Розділимо складові рівняння на m і згрупуємо складові за ознаками сталості і змінності доданків

$$\dot{V}_y = g \cdot (\sin \alpha - \cos \alpha \cdot \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \varphi) + A \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega t) \cdot (\cos \theta + \operatorname{tg} \varphi \cdot \cos \beta \cdot \sin \theta) - \frac{k \cdot V_y}{m}. \quad (2.37)$$

Уведемо наступні позначення:

$$g \cdot (\sin \alpha - \cos \alpha \cdot \cos \beta \cdot \operatorname{tg} \varphi) = A_0, \quad (2.38)$$

$$g \cdot (\cos \theta + \operatorname{tg} \varphi \cdot \cos \beta \cdot \sin \theta) = \Phi_0, \quad (2.39)$$

$$\frac{k}{m} = B_0. \quad (2.40)$$

Тепер рівняння (2.37) можемо записати у вигляді

$$\dot{V}_q + B_0 \cdot V_q = A_0 + A \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega t) \cdot \Phi_0. \quad (2.41)$$

Фізично, константа A_0 являє собою узагальнене прискорення частки від дії гравітаційних та фрикційних сил, а Φ_0 виступає в якості міри ефективності передачі коливань від решета до частки.

Рівняння (2.41) є лінійним неоднорідним диференціальним рівнянням вигляду:

$$\dot{V} + p \cdot V = q(t), \quad (2.42)$$

де $p=B_0=const$;

$q(t)$ – сума сталої (A_0) та гармонійної складових.

Загальний розв’язок отриманого рівняння (2.42) будемо шукати як:

$$V_q = V_{одн.} + V_{част.н.}, \quad (2.43)$$

де $V_{одн.}$ – розв’язок однорідного рівняння;

$V_{част.н.}$ – частковий розв’язок неоднорідного рівняння.

2.3.3. Вирішення однорідного рівняння

Однорідне рівняння:

$$\dot{V}_{одн.} + B_0 \cdot V_{одн.} = 0. \quad (2.44)$$

Розділимо змінні:

$$\frac{dV}{V} = -B_0 \cdot dt, \quad (2.45)$$

проведемо інтегрування:

$$\ln V = -B_0 \cdot t + C_1, \quad (2.46)$$

де C_1 – стале додатне число.

Таким чином, розв'язок однорідного рівняння має вигляд:

$$V_{\text{одн.}} = C \cdot e^{-B_0 t}, \quad (2.47)$$

де C – довільна стала інтегрування, що визначається з початкових умов.

2.3.4. Частковий розв'язок відносно сталої A_0 правої частини рівняння

Знаходимо частковий розв'язок у вигляді: $V_1 = \text{const}$.

Оскільки $\dot{V}_1 = 0$, підставляємо його до рівняння:

$$0 + B_0 \cdot V_1 = A_0, \quad (2.48)$$

і отримуємо

$$V_1 = \frac{A_0}{B_0}. \quad (2.49)$$

2.3.5. Частковий розв'язок відносно гармонійної правої частини рівняння

Гармонійна права частина рівняння має вигляд: $A \cdot \omega^2 \cdot \Phi_0 \cdot \cos(\omega t)$.

Знаходимо частковий розв'язок у вигляді:

$$V_2 = P \cdot \cos(\omega t) + Q \cdot \sin(\omega t). \quad (2.50)$$

Знайдемо похідну:

$$\dot{V}_2 = -P \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) + Q \cdot \omega \cdot \cos(\omega t). \quad (2.51)$$

Підставляємо отримані вирази до рівняння (2.41):

$$\begin{aligned} -P \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) + Q \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) + B_0 \cdot (P \cdot \cos(\omega t) + Q \cdot \sin(\omega t)) = \\ = A \cdot \omega^2 \cdot \Phi_0 \cdot \cos(\omega t). \end{aligned} \quad (2.52)$$

Проведемо групування складових за функціями $\cos(\omega t)$ та $\sin(\omega t)$:

$$\cos(\omega t): \quad Q \cdot \omega + B_0 \cdot P = A \cdot \omega^2 \cdot \Phi_0, \quad (2.53)$$

$$\sin(\omega t): \quad -P \cdot \omega + B_0 \cdot Q = 0, \quad (2.54)$$

Виразимо з рівняння (2.54) Q :

$$Q = \frac{P \cdot \omega}{B_0}, \quad (2.55)$$

Підставимо (2.55) у (2.53):

$$\frac{P \cdot \omega^2}{B_0} + B_0 \cdot P = A \cdot \omega^2 \cdot \Phi_0,$$

або

$$P \cdot \frac{\omega^2 + B_0^2}{B_0} = A \cdot \omega^2 \cdot \Phi_0. \quad (2.56)$$

Знайдемо величини коефіцієнтів P і Q :

$$P = \frac{A \cdot \omega^2 \cdot \Phi_0 \cdot B_0}{B_0^2 + \omega^2}, \quad (2.57)$$

$$Q = \frac{A \cdot \omega^3 \cdot \Phi_0}{B_0^2 + \omega^2}. \quad (2.58)$$

Таким чином, шуканий частковий розв'язок від гармонійної складової матиме вигляд:

$$V_2 = \frac{A \cdot \omega^2 \cdot \Phi_0}{B_0^2 + \omega^2} \cdot (B_0 \cdot \cos(\omega t) + \omega \cdot \sin(\omega t)). \quad (2.59)$$

2.3.6. Загальний розв'язок рівняння руху частки по оригінальному коливальному решету

Загальним розв'язком рівняння (2.41) буде сума отриманих у ході перетворень складових:

$$V_q = C \cdot e^{-B_0 t} + \frac{A_0}{B_0} + \frac{A \cdot \omega^2 \cdot \Phi_0}{B_0^2 + \omega^2} \cdot (B_0 \cdot \cos(\omega t) + \omega \cdot \sin(\omega t)). \quad (2.60)$$

Визначимо сталу інтегрування C .

Прийнявши початкові умови: $t = 0$, $V_q = V_0 = 0$, отримаємо:

$$C + \frac{A_0}{B_0} + \frac{A \cdot \omega^2 \cdot \Phi_0}{B_0^2 + \omega^2} = 0,$$

звідки

$$C = -\frac{A_0}{B_0} - \frac{A \cdot \omega^2 \cdot \Phi_0}{B_0^2 + \omega^2}. \quad (2.61)$$

Підставляючи (2.61) до (2.60) та згрупувавши складові, отримаємо кінцевий розв'язок рівняння руху:

$$V_v = \frac{A_0}{B_0} \cdot (1 - e^{-B_0 t}) + \frac{A \cdot \omega^2 \cdot \Phi_0}{B_0^2 + \omega^2} \cdot (B_0 \cdot \cos(\omega t) + \omega \cdot \sin(\omega t) - B_0 \cdot e^{-B_0 t}). \quad (2.62)$$

Отримане рівняння описує закономірність зміни швидкості руху непрохідної частки по оригінальному решету від часу, однак для практичного застосування більш важливою є динамічна залежність швидкості від переміщення. Слід відмітити, що отримане рівняння (2.62) містить і показникові, і тригонометричні функції, аналітично позбавитися від часу у явному вигляді неможливо, тому отримаємо шукану залежність $V_v(x)$ у параметричній формі.

2.3.7. Залежність швидкості руху непрохідної частки від переміщення

Оскільки швидкість є похідною переміщення за часом, запишемо:

$$V_v = \frac{dx}{dt} \quad (2.63)$$

Переміщення виразимо через інтеграл від швидкості руху частки:

$$x(t) = \int_0^t V_v(\tau) d\tau. \quad (2.64)$$

Підставимо (2.50) у (2.64) і проінтегруємо окремо кожен складову.

Інтегруємо стаціонарну складову:

$$V_{cm} = \frac{A_0}{B_0} \cdot (1 - e^{-B_0 t}).$$

Отримаємо:

$$x_{cm} = \int_0^t \left(\frac{A_0}{B_0} \cdot (1 - e^{-B_0 \tau}) \right) d\tau = \frac{A_0}{B_0} \cdot \int_0^t d\tau - \frac{A_0}{B_0} \cdot \int_0^t e^{-B_0 \tau} d\tau. \quad (2.65)$$

Обчислимо окремо кожен інтеграл:

$$\int_0^t d\tau = t; \quad \int_0^t e^{-B_0 \tau} d\tau = \frac{1 - e^{-B_0 t}}{B_0}.$$

Підставивши до (2.65) знайдені складові і спростивши отримаємо:

$$x_{cm} = \frac{A_0}{B_0} \cdot t - \frac{A_0}{B_0^2} \cdot (1 - e^{-B_0 t}). \quad (2.66)$$

Визначимо коливальну складову швидкості:

$$V_{кол} = \frac{A \cdot \omega^2 \cdot \Phi_0}{B_0^2 + \omega^2} \cdot (B_0 \cdot \cos(\omega t) + \omega \cdot \sin(\omega t)). \quad (2.67)$$

Позначимо:

$$\frac{A \cdot \omega^2 \cdot \Phi_0}{B_0^2 + \omega^2} = \Omega. \quad (2.68)$$

Тепер:

$$x_{кол} = \Omega \cdot \int_0^t (B_0 \cdot \cos(\omega\tau) + \omega \cdot \sin(\omega\tau)) d\tau. \quad (2.69)$$

Обчислимо окремо кожен інтеграл:

$$\int_0^t \cos(\omega\tau) d\tau = \frac{1}{\omega} \sin(\omega t); \quad \int_0^t \sin(\omega\tau) d\tau = \frac{1}{\omega} (1 - \cos(\omega t)).$$

Підставивши до (2.69) знайдені складові і спростивши отримаємо:

$$x_{кол} = \Omega \cdot \left(\frac{B_0}{\omega} \sin(\omega t) + 1 - \cos(\omega t) \right). \quad (2.70)$$

Підставивши значення Ω , вираз матиме вигляд

$$x_{кол} = \frac{A \cdot \omega^2 \cdot \Phi_0}{B_0^2 + \omega^2} \cdot \left(\frac{B_0}{\omega} \sin(\omega t) + 1 - \cos(\omega t) \right). \quad (2.71)$$

Тапер перейдемо до перехідної складової швидкості:

$$V_{неп} = -\frac{A \cdot \omega^2 \cdot \Phi_0 \cdot B_0}{B_0^2 + \omega^2} \cdot e^{-B_0 t}. \quad (2.72)$$

Провівши інтегрування отримаємо:

$$x_{неп} = -\frac{A \cdot \omega^2 \cdot \Phi_0 \cdot B_0}{B_0^2 + \omega^2} \cdot \int_0^t e^{-B_0 \tau} d\tau = -\frac{A \cdot \omega^2 \cdot \Phi_0}{B_0^2 + \omega^2} \cdot (1 - e^{-B_0 t}). \quad (2.73)$$

Підсумуємо складові (2.66), (2.71) і (2.73):

$$x(t) = \frac{A_0}{B_0} \cdot t - \frac{A_0}{B_0^2} \cdot (1 - e^{-B_0 t}) + \frac{A \cdot \omega^2 \cdot \Phi_0}{B_0^2 + \omega^2} \cdot \left(\frac{B_0}{\omega} \sin(\omega t) + 1 - \cos(\omega t) \right) - \frac{A \cdot \omega^2 \cdot \Phi_0}{B_0^2 + \omega^2} \cdot (1 - e^{-B_0 t}). \quad (2.74)$$

Спростивши доданки, отримаємо кінцевий вираз

$$x(t) = \frac{A_0}{B_0} \cdot \left(t - \frac{(1 - e^{-B_0 t})}{B_0} \right) + \frac{A \cdot \omega^2 \cdot \Phi_0}{B_0^2 + \omega^2} \cdot \left(\frac{B_0}{\omega} \sin(\omega t) - \cos(\omega t) + e^{-B_0 t} \right). \quad (2.75)$$

Вирази (2.62) і (2.74) задають сумісно залежність швидкості руху непрохідної частки від переміщення по оригінальному решету у параметричній формі через параметр $t \in [0; \infty)$.

При кожному послідовно взятому значенні t обчислюються значення x і відповідне йому V_v . Чисельну побудову отриманої кривої здійснимо методом Рунге-Кутта 4-го порядку.

Отримані графічні залежності швидкості непрохідної частки від переміщення по поверхням оригінального і класичного решіт наведено на рис. 2.9-2.10.

Наведені залежності побудовані для умов: кут коливань – 60° , кутова швидкість коливань 35 рад/с, при цьому опором шару знехтувано.

Аналіз отриманих залежностей свідчить про надзвичайно малий вплив кута відхилення отворів оригінального решета від вісі. Збільшення кута відхилення отворів β з 0 до 10° , зменшує швидкість переміщення в межах 2% , що не є суттєвим, однак потребує експериментального дослідження впливу на показники технологічної ефективності.

На рис. 2.11 наведено залежність впливу кута відхилення отворів від вісі решета на зниження швидкості переміщення частки.

Вплив опору зернового шару на процес наведено на рис. 2.12

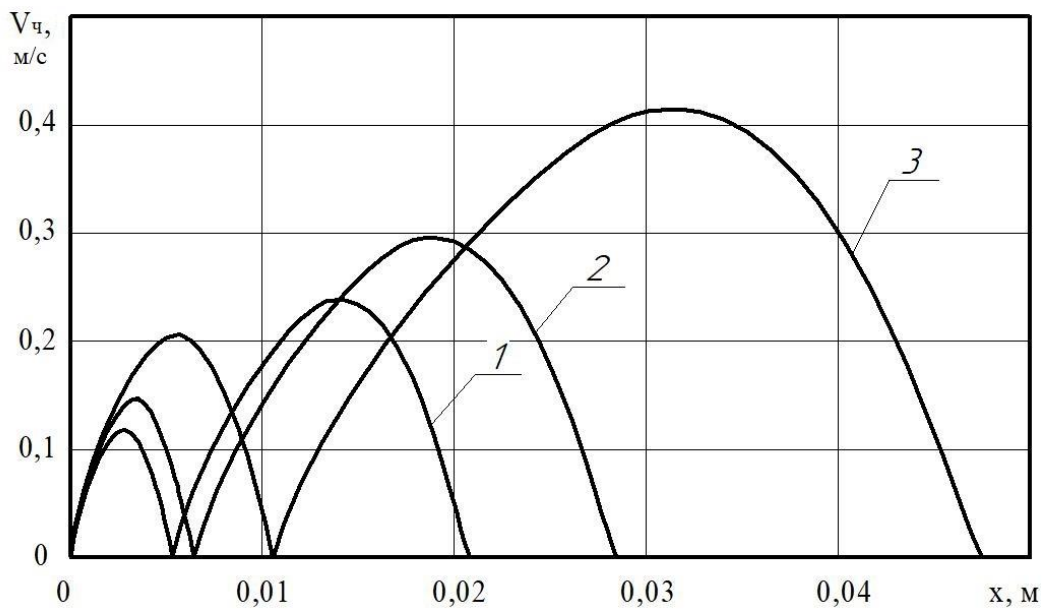


Рис. 2.9. Залежність швидкості непрохідної частки від переміщення по оригінальному решету з кутом відхилення отворів від вісі решета $\beta=10^\circ$:

1 – нахил решета $\alpha=8^\circ$, 2 – нахил решета $\alpha=12^\circ$; 3 – нахил решета $\alpha=20^\circ$

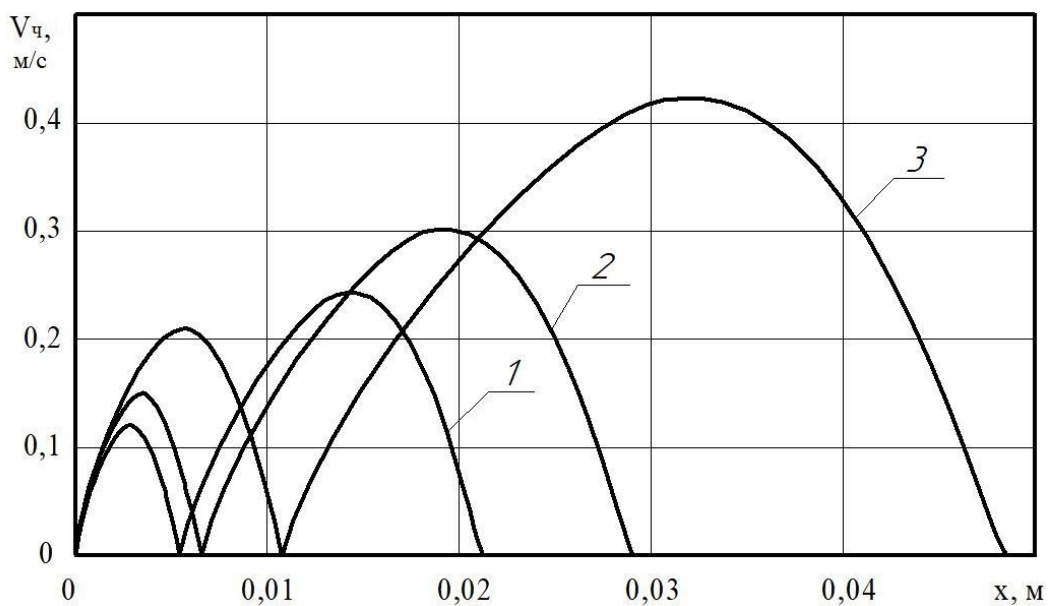


Рис. 2.10. Залежність швидкості непрохідної частки від переміщення по класичному решету з кутом відхилення отворів від вісі решета $\beta=0^\circ$:

1 – нахил решета $\alpha=8^\circ$, 2 – нахил решета $\alpha=12^\circ$; 3 – нахил решета $\alpha=20^\circ$

Аналіз отриманих результатів.

При кутах α менших Збільшення величини кута β , що характеризує міру відхилення отворів від вісі решета знижує швидкість руху часток і у

гравітаційному, і у вібраційному режимах. У гравітаційному режимі спостерігається суттєве зменшення швидкості, що пояснюється наявністю функції $\cos(\beta)$ у рушійній силі. У вібраційному режимі зменшення швидкості несуттєве (у межах 2%), що обумовлене малою величиною коефіцієнту Φ_0 , на який впливає кут відхилення отворів β .

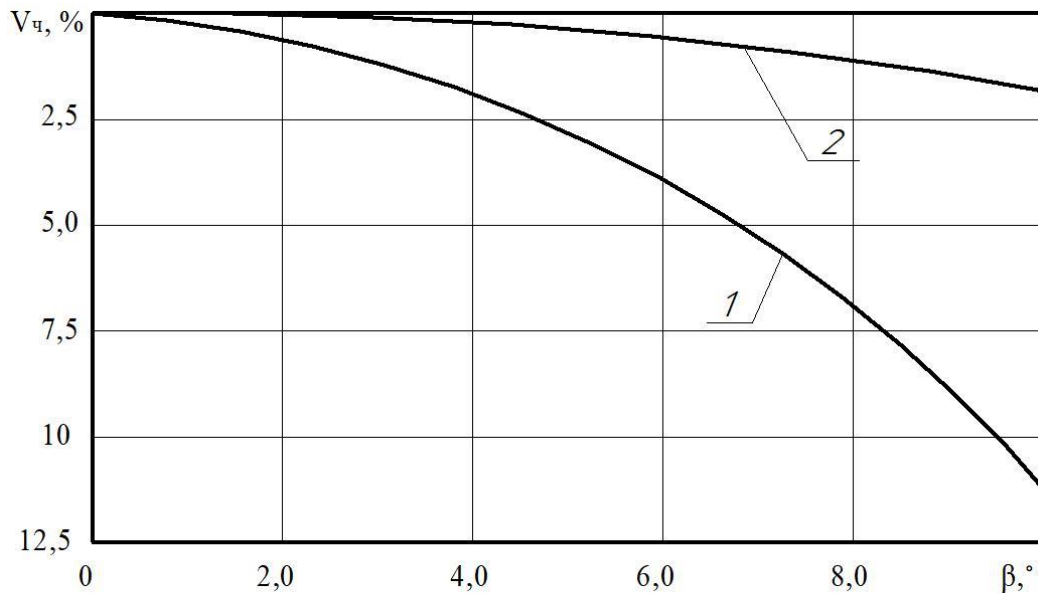


Рис. 2.11. Залежність впливу кута відхилення отворів β від вісі решета на зниження швидкості переміщення частки:

1 – класичне решето ($\beta=0$); 2 – оригінальне решето ($\beta=10^\circ$)

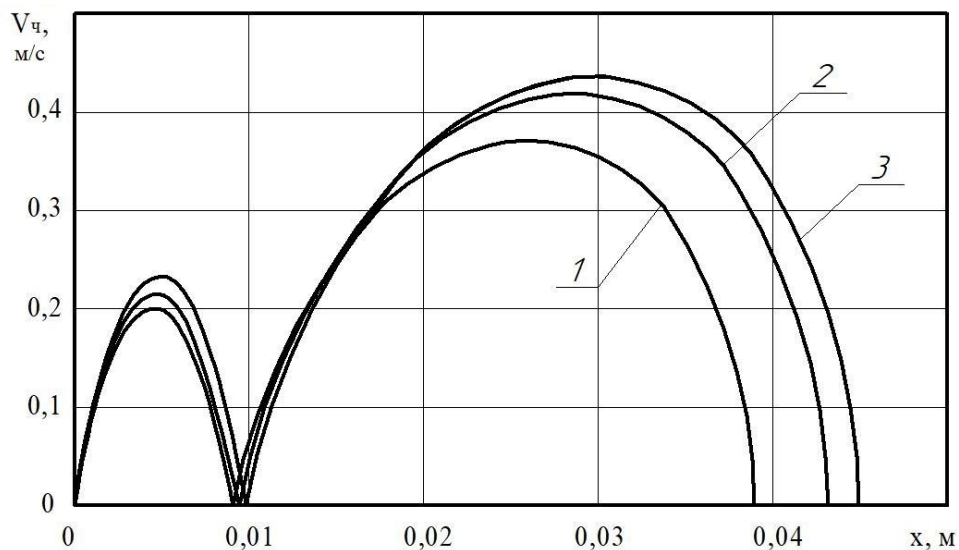


Рис. 2.12. Залежність швидкості непрохідної частки від переміщення по решету для різних значень опору зернового шару:

1 – з опором ($B_0=3c^{-1}$); 2 – з опором ($B_0=1c^{-1}$); 3 – без опором ($B_0=0$)

Кут коливань θ забезпечує розподіл сил між поздовжнім та нормальним напрямками. При малих значеннях θ нормальна складова інерційної сили менша і забезпечує умову руху часток без відриву від решета ($K < 1$) у більшому діапазоні значень кутової швидкості коливальника.

Кутова швидкість коливальника суттєво впливає на прискорення решета, збільшує рушійну силу та нормальну реакцію, що в свою чергу пришвидшує настання критичного моменту відривання частки від поверхні решета і погіршує ефективність процесу.

Коефіцієнт опору зернового шару визначає максимальну швидкість руху частки і стримує пульсації, стабілізуючи переміщення. Збільшення опору призводить до зменшення швидкості часток, сприяє збільшенню товщини шару і знижує інтенсивність їх перемішування, погіршуючи ефективність процесу, що підтверджує відомий технологічний ефект.

Висновки до розділу II

1. У теоретичній частині нами запропоновано фізичну модель просіювання пласкої частки крізь решето із прямокутними зигзагоподібно розташованими отворами і отримано аналітичну залежність ймовірності просіювання від основних параметрів решета та кута відхилення отворів від вісі решета.

2. Обґрунтовано критичний кут відхилення отворів, при досягненні якого забезпечується гарантована ймовірність потрапляння прохідних часток в площину отворів решета і процес сепарації із імовірнісного перетворюється на детермінований. Зокрема, для підсівного решета з розмірами отворів 2×25 мм і шириною перетинок 2 мм, кут відхилення отворів становить $\beta \geq 4,6^\circ$.

3. Розроблено і вирішено диференційне рівняння переміщення непрохідної частки по оригінальному плоскому нерухомому решету з прямокутними отворами, відхиленими відносно вісі решета, яке враховує також силу опору шару зернового матеріалу. Встановлено вплив кута відхилення отворів β на швидкість руху непрохідної частки. Зокрема, збільшення β до 10°

призводить до зменшення швидкості більш ніж на 20% при куті встановлення нерухомого решета $\alpha=45^\circ$. Крім того виявлено, що при куті $\alpha=30^\circ$ в аналогічних умовах, процес переміщення частки припиняється.

4. Розроблено і вирішено диференційне рівняння переміщення непрохідної частки по оригінальному плоскому решету з прямокутними отворами, відхиленими відносно вісі решета, яке враховує також силу опору шару зернового матеріалу. Встановлено два можливих режими його роботи – гравітаційний, коли сума кутів встановлення решета і відхилення отворів більша ніж кут тертя часток по поверхні ($\alpha+\beta>\varphi$) і вібраційний, – коли $\alpha+\beta\leq\varphi$.

5. Збільшення кута відхилення отворів β з 0 до 10° призводить до зниження швидкості руху часток по решету і у гравітаційному, і у вібраційному режимах. Причому, на відміну від гравітаційного, у вібраційному режимі спостерігається не суттєве (до 2%) зниження швидкості, що не потребує зміни режимів роботи сепаратора при використанні оригінальних решіт.

6. Діапазон раціональних значень кута напряду коливань $\theta=60\dots70^\circ$ при куті тертя часток $\varphi=21^\circ$ і кутах відхилення отворів $\beta=0\dots10^\circ$ дозволяє забезпечити ефективну передачу коливань часткам при постійному контакті з решетом, що досягається умовою безвідривного руху при показнику кінематичного режиму $K<1$.

7. Отримані теоретичні залежності в цілому узгоджуються з загальною фізикою процесу сепарації на плоских решетах з продовгуватими отворами, однак ступінь адекватності аналітичних моделей реальному процесу потребує проведення експериментальних досліджень.

РОЗДІЛ ІІІ

ПРОГРАМА ТА МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Мета, задачі та програма експериментальних досліджень

Теоретичні дослідження, результати яких представлено у Розділі 2, дозволили обґрунтувати позитивний ефект від ймовірності потрапляння часток у площину отворів від застосування зміщення осі отворів відносно вісі решета. Також встановлено аналітичні залежності між конструкційними параметрами плоского коливального робочого органу із запропонованим удосконаленням та кінематичними характеристиками руху зернових часток. Разом з тим, побудована математична модель руху частинок ґрунтується на ряді припущень, які обмежують точність аналітичних досліджень. Зокрема, у теоретичній моделі враховано вплив опору шару зерна шляхом введення коефіцієнту опору без врахування коефіцієнтів внутрішнього тертя оброблюваного матеріалу, а також не враховано варіативність коефіцієнтів тертя й опору залежно від товщини шару матеріалу на решеті та швидкості руху, що потребує експериментального уточнення і перевірки адекватності моделі реальному процесу. Крім того, важливим етапом перевірки гіпотези про підвищення ефективності сепарації за рахунок застосування решіт із зигзагоподібно розташованими отворами і порівняння ефекту сепарації запропонованого та класичного робочого органу можливо отримати тільки емпірично, на основі проведення спостережень і експериментів, що і є наступним етапом дисертаційної роботи [41, 101, 104].

Таким чином, метою експериментальних досліджень є встановлення кількісних залежностей між конструкційними та режимними параметрами плоского коливального решета із зигзагоподібним розміщенням продовгуватих отворів і показниками ефективності сепарації зернового матеріалу, а також визначення раціональних значень досліджуваних факторів для забезпечення максимальної якості очищення зерна озимої пшениці та інших зернових культур.

Для досягнення поставленої мети передбачено послідовне вирішення наступних задач експериментальних досліджень:

- розробити та виготовити дослідні зразки решітних полотен із зигзагоподібним розміщенням отворів з різними кутами відхилення β від поздовжньої вісі решета, що перекривають весь практично значущий діапазон даного параметра;
- обґрунтувати вибір досліджуваних факторів і критерію оцінки, а також визначити діапазони варіювання факторів на підставі результатів пошукових однофакторних досліджень;
- скласти матрицю планування повного факторного експерименту на основі застосування центрального композиційного плану другого порядку та реалізувати її на лабораторній установці;
- виконати статистичну обробку результатів дослідів, перевірити відтворюваність дослідів за критерієм Кохрена, значущість коефіцієнтів регресії за t -критерієм Стюдента та адекватність регресійних моделей за F -критерієм Фішера;
- провести аналіз поверхонь відгуку та визначити раціональні конструкційні параметри і режими роботи решета за методом функції бажаності Харрінгтона;
- здійснити порівняльні дослідження запропонованої конструкції решета відносно традиційної ($\beta = 0^\circ$) та підтвердити перспективність даного технічного рішення;
- встановити ступінь адекватності результатів теоретичних і експериментальних досліджень.

Загальна програма експериментальних досліджень охоплює чотири послідовних етапи, що відповідають загальноприйнятій в аграрній науці методології [101, 103-105].

Перший етап експериментальних досліджень – підготовчий: проектування та виготовлення дослідних зразків решіт; відпрацювання

методики та порядку проведення дослідів; підготовка зернового матеріалу та вимірювальної і допоміжної апаратури і обладнання; проведення пошукових однофакторних дослідів для уточнення діапазонів варіювання факторів і ранжування факторів за ступенем їх впливу на критерій оцінки.

Другий етап експериментальних досліджень – основний під час проведення якого відбувалася реалізація центрального композиційного плану другого порядку (ЦКП 2³) з варіюванням питомої подачі, частоти коливань та кута відхилення осей отворів від осі решета; відбір та аналіз проб прохідної і непрохідної фракцій після кожного дослідів; розрахунок загальної ефективності сепарації.

Третій етап експериментальних досліджень – аналітичний, що включав статистичну обробку даних у програмному комплексі STATISTICA 12; побудову та верифікацію статистичних регресійних математичних моделей другого порядку; аналіз поверхонь відгуку попарного впливу факторів на критерій оцінки ефективності розділення та виявлення раціональних конструкційних та технологічних параметрів решета з зигзагоподібним розташуванням отворів.

Заключний, четвертий етап – проведення порівняльних випробувань сепаратора, оснащеного оригінальним решітним полотном і базової конструкції при роботі на різних зернових культурах з метою об'єктивного встановлення переваг запропонованого робочого органу у показниках технологічної ефективності і підтвердження сформульованої первинної гіпотези.

3.2. Об'єкт, предмет та умови проведення експериментальних досліджень

Об'єктом експериментальних досліджень є процес сепарації зернового матеріалу на плоскому коливальному решеті із зигзагоподібним розміщенням продовгуватих прямокутних отворів.

Предметом досліджень є кількісні залежності ефективності сепарації зернового матеріалу від питомої подачі, частоти коливань решітного стану та кута відхилення осей отворів від поздовжньої осі решета.

3.2.1. Лабораторна установка для дослідження решітного очищення

Експериментальні дослідження проводились на базі лабораторії кафедри сільськогосподарського машинобудування Центральноукраїнського національного технічного університету (м. Кропивницький) із використанням лабораторного сепаратора Petkus Wutha K 294 A (Німеччина) (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Загальний вигляд лабораторного сепаратора Petkus Wutha K 294A

Схему роботи лабораторного сепаратора Petkus Wutha K 294A наведено на рис. 3.2.

Вибір наведеного лабораторного сепаратора обумовлений сукупністю технічних переваг, а саме – можливістю точного відтворення технологічних режимів роботи промислових зерноочисних машин загального призначення; наявністю широкого діапазону регулювання основних кінематичних параметрів; можливістю швидкої заміни решітних поверхонь; високою повторюваністю результатів завдяки стабільності параметрів роботи та наявністю засобів контролю. Основні технічні характеристики сепаратора зведена до таблиці 3.1.

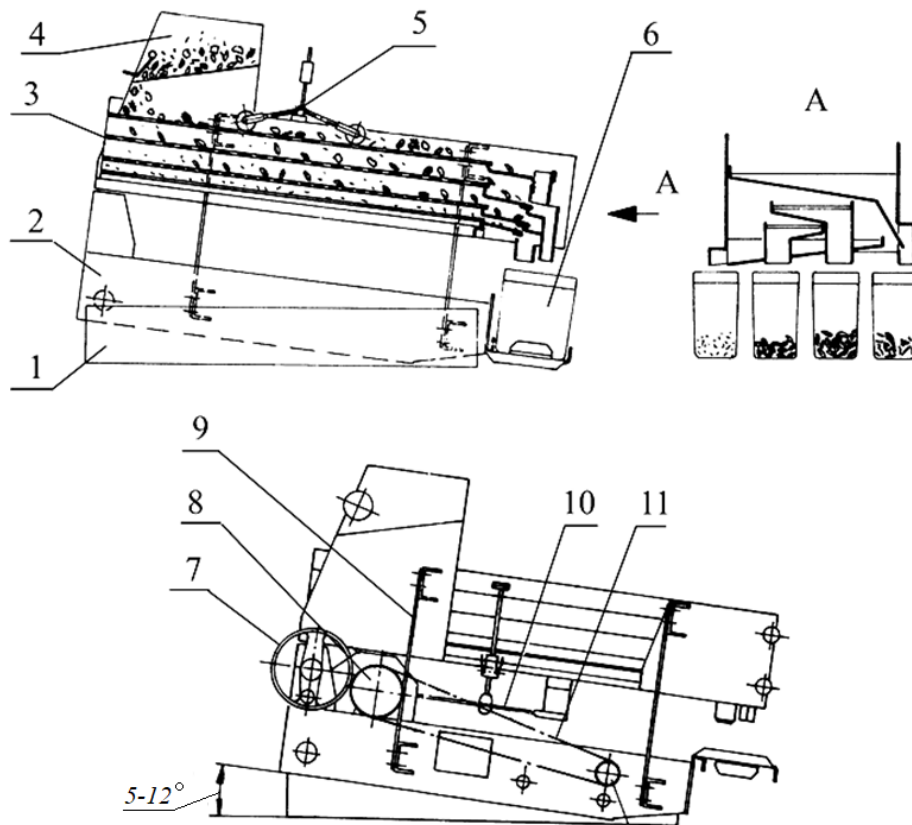


Рис. 3.2. Схема лабораторного сепаратора Petkus Wutha K 294 A:

1 – рама лабораторного сепаратора; 2 – остов сепаратора; 3 – грохот (решітні стани); 4 – завантажувальний бункер із заслінкою-дозатором; 5 – механічний струшувач; 6 – місткості для збирання продуктів розділення; 7 – маховик зміни кута нахилу грохота; 8 – ексцентриковий механізм приводу решіт; 9 – гнучкі підвіски грохота; 10 – шатун; 11 – механізм приводу.

Конструктивно лабораторний сепаратор (рис. 3.2) складається з таких основних вузлів: зварної рами 1; кузова з механізмом регулювання кута нахилу 2; грохота (решітного стану) 3, підвішеного на пружних підвісках 9; бункера-завантажувача з регульованою заслінкою 4; механічного струшувача-очисника решета 5; ємностей для роздільного збирання фракцій 6 та механізму приводу 11, що складається з електродвигуна, клинопасової передачі, ексцентрикового валу 8 і шатунів 10. Регулювання частоти коливань здійснювався за допомогою частотного перетворювача HE200-T3S-2R2G (рис. 3.3 а). Тарування частотного перетворювача здійснювалося за допомогою механічного годинникового тахометра ІО-30 (рис. 3.3 б). Контроль частоти

коливань під час проведення дослідів проводили електронним тахометром для безконтактного вимірювання обертів DT-2234C+ (рис. 3.3 в). Встановлення кута нахилу решета здійснювався за допомогою обертання маховика 7 (рис. 3.2) штатного механізму регулювання лабораторної установки.

Таблиця 3.1.

Технічна характеристика лабораторного сепаратора Petkus Wutha K 294 A

Найменування параметра	Значення
Габаритні розміри, мм	
- довжина	930
- ширина	520
- висота	700
Маса, кг	61
Ширина решета, мм	280
Довжина решета, мм	710
Площа решета, м ²	0,2
Частота коливань, колів./хв	400
Амплітуда коливань, мм	16
Кут нахилу решітного стану, °	5...12 (регульований)
Продуктивність, кг/год	до 600
Потужність електродвигуна, кВт	0,55
Напруга живлення, В	380
Частота струму, Гц	25-50 (регульована)

Рамка решіт лабораторного сепаратора сконструйована таким чином, що в неї можна встановити до трьох робочих решіт та одне глухе днище. Решітний грохот 3 оснащений системою відведення продуктів розділення, що за умови встановлення всіх трьох решіт забезпечує поділ зернового матеріалу на чотири фракції. Під час роботи сепаратора зібрані решета фіксуються в решітному стані двома швидкоз'ємними кронштейнами. Робочі решета встановлюються у дерев'яні обвідні рами, конструкція яких забезпечує їх оперативне очищення під час переходу на очищення іншої культури, сорту чи навіски зернового матеріалу. Дерев'яні рамки решіт мають спеціальні пояски, що дозволяють компонувати їх у вертикальний пакет: вони встановлюються одна над одною і формують єдиний жорсткий блок із чотирьох рам, який можна монтувати та демонтувати як цілісний вузол сепаратора.



а) б) в)

Рис. 3.3. Регулювання частоти коливань решета:

а – частотний перетворювач HE200-T3S-2R2G; б – тарування годинниковим тахометром; в – контроль під час дослідів безконтактним тахометром

Робочий процес лабораторної установки відбувається так. У завантажувальний бункер із заслінкою-дозатором 4 подається навіска зернового матеріалу, який підлягає обробці, а необхідна інтенсивність подачі регулюється заслінкою. Зерновий матеріал спрямовується спочатку на верхнє решето сепаратора, а далі – послідовно на нижчі решета, де здійснюється її розділення за розмірами, після чого через вихідні вікна з протилежного боку від подачі виділені компоненти спрямовуються у відповідні приймальні місткості. Для забезпечення високої якості розділення після обробки кожної навіски решета очищували, для чого послаблювали швидкокоз'ємний натяжний пристрій, виймали увесь блок решіт. Очищення спускних каналів приймального матеріалу проводили після відкидання задньої стінки утримувача решіт.

Для отримання двох фракцій у серії основних дослідів, коли сепаратор працював із одним решетом, застосовували тільки верхню решітну рамку, а другу і третю рамку встановлювали у грохот без решітних полотен. При сортуванні зернової суміші на установці з трьома решетами можливо отримати чотири вихідні фракції: перший вихід – це сід з першого (верхнього) решета,

що містить крупні домішки; другий – крупне зерно основної культури; третій – фракція середнього зерна; четвертий – дрібні домішки.

3.2.2. Дослідні зразки решітних полотен

Для проведення досліджень виготовлено комплект решітних полотен із зигзагоподібним розміщенням продовгуватих отворів (рис. 3.34) методом лазерного різання на верстаті з числовим програмним керуванням із листової конструкційної сталі марки Ст3 товщиною 1,2 мм.



Рис. 3.4. Дослідні решітні полотна із зигзаговидними продовгуватими отворами

Метод лазерного різання обрано з огляду на забезпечення найвищої точності виготовлення геометричних параметрів отворів (похибка не перевищує $\pm 0,1$ мм). Для убезпечення від впливу на процес гострих крайок отворів задирок і напливів, що могли утворитися під час лазерного різання металу під час виготовлення решіт, їх поверхні були відшліфовані за допомогою ручної шліфувальної машини.



Рис. 3.5. Проведення експериментальних досліджень по вивченню впливу конструкцій решета із зигзагоподібним розміщенням отворів на ефективність очищення на лабораторному сепараторі Petkus Wutha K 294 А

Геометричні параметри дослідних решіт наступні – загальні розміри решітного полотна – 280×710 мм (із врахуванням зони кріплення (рамки)); робоча площа – 280×710 мм = $0,2$ м²; довжина отвору $l = 30$ мм; ширина отвору

$b=2$ мм; ширина поздовжньої перетинки $t_1=5$ мм; ширина поперечної перетинки $t_2=2$ мм. Враховуючи наведені параметри решітного полотна визначимо теоретичне значення коефіцієнта живого перерізу, що можна розрахувати за відомою формулою [6, 41] і який становить:

$$\xi = \frac{l \cdot b}{(l + t_1)(b + t_2)} \cdot 100\% = \frac{30 \cdot 2}{(30 + 5)(2 + 2)} \cdot 100\% = 42,8\%. \quad (3.1)$$

Для проведення експериментальних досліджень виготовлено п'ять варіантів решітних полотен із різними кутами відхилення осей отворів β від поздовжньої осі решета: $\beta = 0^\circ$ (контрольне решето з паралельним розміщенням отворів), $\beta = 5^\circ$, $\beta = 8^\circ$, $\beta = 10^\circ$ та $\beta = 11^\circ$. Кожне полотно проходило вхідний контроль, що включав: вимірювання фактичних розмірів отворів у десяти випадкових точках (допуск $\pm 0,2$ мм); перевірку кута відхилення за допомогою кутоміра (допуск $\pm 0,5^\circ$); візуальний контроль поверхні на наявність дефектів різання; перевірку площинності полотна (відхилення не більше 2 мм на довжині 600 мм). Фактичне значення коефіцієнта живого перерізу відрізнялось від розрахункового не більше ніж на 1,2%, що підтверджує точність виготовлення решета.

3.2.3. Вибір зернового матеріалу для проведення експериментальних досліджень

Для проведення експериментальних досліджень використовувався зерновий ворох озимої пшениці врожаю 2024 року, отриманий після зернозбирального комбайна класичної схеми обмолоту, які взято з кількох агропідприємств Кіровоградської області. Вибір зернового матеріалу саме цього виду обумовлений тим, що озима пшениця є основною зерною культурою регіону, а її ворох характеризується типовим для зони Степу набором домішок.

Фізико-механічні властивості зернового матеріалу визначалися відповідно до вимог чинних державних стандартів і наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2.

Основні фізико-механічні властивості зернового матеріалу, обраного для проведення експериментальних досліджень

Показник	Значення	Метод визначення
Вологість вороху, %	12...16	ДСТУ ISO 712:2015
Натура, г/л	760...780	ДСТУ 3768:2019
Маса 1000 зернівок, г	38...42	ДСТУ 4138:2002
Засміченість вихідного вороху, %	8...12	ДСТУ 3768:2019
Вміст прохідної фракції, %	8...10	Ручне розбирання проби
Середній еквівалентний діаметр, мм	3,8...4,2	Вимірювання штангенциркулем

Підготовка зернового матеріалу до проведення експериментів включала ряд робіт [110], серед яких попереднє очищення – видалення із зернового вороху крупних домішок (соломи, великих стебел бур'янів, збоїни), що майже гарантовано можуть застрягнути в отворах досліджуваних решіт. Така попередня підготовка матеріалу дозволяє виключити похибки від забивання отворів.

Далі послідовно проводили визначення вихідного вмісту фракцій шляхом зважування на лабораторних вагах (рис. 3.6) з дискретністю 0,01 г за допомогою плоского ручного решітного класифікатора (рис. 3.7). Проводили ручне розбирання середньої проби масою 1 кг; контроль однорідності перед кожною серією дослідів за показниками вологості вологоміром Wile 55 з точністю 0,5% (рис. 3.8) та засміченості (відбором контрольних проб);

порціонування – розподіл підготовленого матеріалу на порції по 2 кг для проведення окремих дослідів.



Рис. 3.6. Зважування підсіву на вагах



Рис. 3.7. Оцінка вмісту домішок на ручному решітному класифікаторі



Рис. 3.8. Оцінка вологості зерна вологоміром Wile 55

Загалом для проведення всього комплексу експериментальних досліджень було використано близько 150 кг зернового матеріалу.

3.2.4. Вимірювальна апаратура та допоміжне обладнання для проведення експериментів

Для забезпечення точності вимірювань і об'єктивності результатів спостережень було обґрунтовано і використано наступний комплекс вимірювальної апаратури (табл. 3.3).

Вся вимірювальна апаратура, що використовувалася у досліді має заводське походження, паспорти з характеристиками і на час проведення експериментальних досліджень мала чинні свідоцтва про повірку або калібрування; перед початком досліджень проводилась перевірка приладів на контрольних зразках.

Вимірювальна апаратура та її метрологічні характеристики

Прилад / обладнання	Модель	Діапазон / точність	Призначення
Тахометр цифровий безконтактний (рис. 3.3 в)	DT-2234C+	2,5...99999 об/хв, $\pm 0,05\%$	Вимірювання частоти коливань решітного стану
Секундомір електронний	СОСпр-2б-2	точн. 0,01 с	Тарування бункера
Ваги лабораторні (рис. 3.6)	KERN EMB 600-2	до 600 г, 0,01 г	Зважування проб зерна та домішок
Штангенциркуль цифровий	ШЦЦ-I-150	0...150 мм, $\pm 0,01$ мм	Вимірювання розмірів зернівок та елементів решіт
Класифікатор решітний ручний (рис. 3.7)	СЛ-200	1,2...4 мм	Оцінка фракційного складу зернової маси
Вологомір зерна (рис. 3.8)	Wile 55	5...45%, $\pm 0,5\%$	Контроль вологості матеріалу у дослідах
Пурка літрова	ПХ-1	–	Визначення природи зерна
Шафа сушильна	СНОЛ-3,5.3,5.3,5/3,5-И2	50...350°C	Визначення загальної вологості вороху (вагометричний метод)

3.3. Методика планування та проведення багатофакторного експерименту**3.3.1. Порядок вибору факторів та критерію оптимізації**

Керуючись проведеними в розділі 2 аналітичними дослідженнями та на основі результатів пошукових однофакторних експериментів, що реалізовані відповідно до процедури ранжування факторів за ступенем їх впливу на ефективність сепарації, для включення до плану багатофакторного експерименту обрано три найбільш значимих фактори.

За фактор x_1 прийнято питому подачу матеріалу на очищення q_b , кг/(дм·год). Питома подача зернової суміші характеризує інтенсивність навантаження на одиницю ширини решета і визначається як відношення масової продуктивності до загальної ширини решета. Фактор x_1 має прямий вплив на товщину шару матеріалу на решеті, час перебування частинок у зоні розділення та ймовірність контакту часток із отворами, а отже і проходження крізь отвори прохідних часток. Пошукові попередні однофакторні дослідження підтвердили, що за умови, коли питома подача є меншою 600 кг/(дм·год) товщина шару матеріалу є недостатньою для повноцінного завантаження (використання) робочої поверхні решета, тоді як при значеннях питомої подачі більше 1800 кг/(дм·год) спостерігається різке зниження ефективності роботи решітної частини через її перевантаження. Діапазон варіювання фактора x_1 встановлено від 800 до 1500 кг/(дм·год) з центром плану 1150 кг/(дм·год) та інтервалом варіювання 350 кг/(дм·год) [10, 102].

Фактор x_2 – частота коливань решітного стану n , колив/хв. Частота коливань визначає інтенсивність вертикальної сегрегації частинок у товщі зернового шару та кількість контактів частинок з решітною поверхнею за одиницю часу. Підвищення частоти коливань сприяє активізації внутрішньшарових процесів, проте надмірне зростання призводить до відриву часток від поверхні решета, збільшення забивання отворів і підвищує травмування зерна. Пошукові попередні досліди дозволили встановити, що при низькій частоті коливань менше 300 колив/хв рух матеріал по решету характеризується недостатньою активізацією, спостерігається повільне переміщення компонентів зерноsumіші по решітній поверхні і як наслідок, зростання товщини шару; при частоті коливань понад 500 колив/хв має місце підвищене забивання отворів решета дрібними чи граничними до проходження компонентами зерноsumіші (домішками). Обраний діапазон варіювання фактора x_2 встановлено в діапазоні значень 300...500 колив/хв з центром 400 колив/хв та інтервалом варіювання 100 колив/хв.

Фактор x_3 – кут відхилення осей отворів від поздовжньої вісі β , °. Цей значний для досліджуваної конструкції решета фактор визначає інтенсивність поперечного переміщення частинок у робочій зоні решета. Теоретичні дослідження, представлені у Розділі 2, підтвердили, що відхилення осей отворів від поздовжньої осі решета створює додаткову поперечну складову швидкості руху частинок, що загалом підвищує ймовірність контакту компонентів зерноsumіші з отворами. За результатами пошукових дослідів підтверджено, що за умови, коли $\beta = 0^\circ$ (традиційне решето з паралельним розміщенням отворів) ефективність сепарації є найнижчою. В свою чергу збільшення кута β до 10° супроводжується зростанням ефективності, тоді як подальше збільшення цього кута погіршує транспортуючу здатність решітної поверхні. Діапазон варіювання фактора x_3 встановлено від 0 до 10° з центром 5° та інтервалом варіювання 5° [102].

Позначення та рівні варіювання факторів, які встановлені на основі пошукових досліджень зведені до таблиці 3.4.

Таблиця 3.4.

Фактори багатofакторного експерименту, їх позначення та рівні варіювання

№	Найменування фактора	Позначення	Нижній рівень (-1)	Центр плану (0)	Верхній рівень (+1)	Інтервал варіювання	Зіркові точки ($\pm\alpha$)
1	Питома подача, q_b кг/(дм·год)	x_1	800	1150	1500	350	$\pm 1,682$
2	Частота коливань, n кол/хв	x_2	300	400	500	100	$\pm 1,682$
3	Кут відхилення осей отворів, β°	x_3	0	5	10	5	$\pm 1,682$

Постійними на рівні центру плану експерименту факторами є амплітуда коливань $a = 16$ мм і кут нахилу решітного стану $\alpha = 8^\circ$. Зазначені фактори обиралися постійними, оскільки амплітуда коливань базового сепаратора є незмінною, а кут нахилу решета, знаходиться в зоні оптимуму, що виявлено

проведеними попередніми однофакторними дослідженнями, при цьому вибрані рівні відповідають типовим виробничим умовам [102].

В якості критерію оцінки ефективності Y обрано повноту виділення домішок, яку можна розрахувати, використовуючи відому формулу [2, 6]:

$$Y = \frac{m_{\text{дом.вих}} - m_{\text{дом.прох}}}{m_{\text{дом.вих}}} \times 100\%, \quad (3.2)$$

де $m_{\text{дом.вих}}$ – сумарна маса домішок у вихідному матеріалі, що визначається

методом ручного розбирання контрольної навіски зернової суміші, гр.;

$m_{\text{дом.прох}}$ – маса домішок у зерні після проведення решітного очищення, гр.

Вибір наведеного показника як критерія оцінки обумовлений тим, що саме повнота виділення домішок є основним показником якості роботи решітного очищення і він безпосередньо визначає можливість зберігання очищеного зерна, його подальшої переробки або використання як насінневого матеріалу відповідно до вимог ДСТУ 3768:2019 [3].

Повнота виділення домішок Y є адитивним показником, що виражається у відсотках, має чіткий фізичний зміст та вимірюється простим методом зважування матеріалу і домішок із достатньою для дослідів точністю.

3.3.2. Методологія центрального композиційного планування

Для встановлення кількісних залежностей між досліджуваними факторами та критерієм оптимізації застосовувалась методологія планування багатофакторного експерименту у формі центрального композиційного плану другого порядку з зірковими точками (ЦКП 2³) [103].

Вибір центрального композиційного плану обумовлений такими перевагами порівняно з іншими схемами планування [103, 105, 106]: можливістю побудови математичної моделі у вигляді полінома другого порядку, що адекватно описує нелінійні залежності в обраному для

дослідження факторному просторі; ортогональністю або близькістю до ортогональності, що забезпечує незалежність оцінок отриманих коефіцієнтів регресії; можливістю поетапної послідовної реалізації плану, так спочатку реалізується ядро плану експерименту 2^3 , а потім зіркові точки; порівняно невеликою загальною кількістю дослідів при дослідженні впливу на критерій оптимізації трьох факторів.

Центральний композиційний план включає три групи точок:

- точки повного факторного експерименту 2^3 – вершини куба у факторному просторі; кількість точок N ;
- зіркові (аксіальні) точки, які розташовані на відстані $\pm\alpha$ від центру плану по кожній осі координат; загальна кількість зіркових точок складає: $2 \times 3 = 6$. Зіркове плече $\alpha = 1,682$ є розрахованим за умови ортогональності плану для трьох факторів;
- дослідження в центрі плану – повторні досліди при нульових рівнях всіх факторів, необхідні для оцінки дисперсії відтворюваності; кількість: $n_0 = 6$.

Загальна кількість дослідів під час реалізації центрального композиційного плану складає $N = 2^3 + 2 \cdot 3 + 6 = 8 + 6 + 6 = 20$. З урахуванням трикратної повторюваності кожного дослідів (за виключенням центральних точок) загальна кількість дослідних запусків експериментальної установки складає 50.

Апроксимація результатів плану експериментальних досліджень здійснювалась поліномом другого порядку:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2, \quad (3.3)$$

де b_0 – вільний член рівняння регресії;

b_1, b_2, b_3 – коефіцієнти при лінійних членах рівняння регресії;

b_{12}, b_{13}, b_{23} – коефіцієнти попарної взаємодії факторів;

b_{11}, b_{22}, b_{33} – коефіцієнти при квадратичних членах рівняння регресії.

3.3.3. Матриця планування експериментальних досліджень

Матриця планування експерименту ЦКП 2³ в кодovаних та натуральних значеннях факторів представлена в таблиці 3.5. Для визначення кодovаних факторів скористалися відомою залежністю [103, 106, 107]:

$$x_i = \frac{(X_i - X_{0i})}{\Delta X_i}, \quad (3.4)$$

де X_i – натуральне значення фактора;

X_{0i} – фактичне значення фактора на нульовому рівні (в центрі плану);

ΔX_i – прийнятий інтервал варіювання зміни фактора.

Таблиця 3.5.

Матриця планування центрального композиційного плану ЦКП 2³

№ досліджу	Кодоване значення фактора			Натуральне значення фактора		
	x_1	x_2	x_3	q_b , кг/(дм·год)	n , кол/хв	β , град
1	-1	-1	-1	800	300	0
2	+1	-1	-1	1500	300	0
3	-1	+1	-1	800	500	0
4	+1	+1	-1	1500	500	0
5	-1	-1	+1	800	300	10
6	+1	-1	+1	1500	300	10
7	-1	+1	+1	800	500	10
8	+1	+1	+1	1500	500	10
9 центр	0	0	0	1150	400	5
10	-1,682	0	0	562	400	5
11	+1,682	0	0	1738	400	5
12	0	-1,682	0	1150	232	5
13	0	+1,682	0	1150	568	5
14	0	0	-1,682	1150	400	-3,4
15	0	0	+1,682	1150	400	13,4
16 центр	0	0	0	1150	400	5

Враховуючи те, що під час розрахунку натурального значення зіркової точки 14 кут нахилу β виходить за межі фізично можливих, дослідження

проводяться на граничних значеннях ($\beta_{\min} = 0^\circ$) із відповідним перерахунком координат у матриці.

3.3.4. Порядок проведення експериментальних досліджень та відбір проб

Кожен дослід проводився в наступній послідовності. На початку встановлювались і перевірялися задані значення частоти коливань решітного стану цифровим безконтактним тахометром DT-2234C+, амплітуди коливань – віброметром ВП-2М та кута нахилу кутоміром КУ-180. Решітне полотно з відповідним кутом нахилу отворів β встановлювалося в рамку решітного стану лабораторного сепаратора Petkus Wutha К 294 А, після чого проводилося додаткове очищення робочої поверхні щітками від залишків попередніх досліджень.

До бункера сепаратора Petkus Wutha К 294 А завантажувалась підготовлена порція зернового матеріалу масою 2 кг. Заслінкою бункера встановлювалась задана відтарована питома подача q_b , значення якої попередньо контролювалось шляхом зважування матеріалу, що пройшов через решето за проміжок часу 60 с, та проводився перерахунок на годинну продуктивність решітного очищення зерна, віднесена до площі решета.

Після досягнення лабораторним сепаратором стаціонарного режиму роботи відкривалася заслінка і відбувалося решітне розділення матеріалу на прохідну і сходову фракції.

Прохідна фракція (дрібні домішки, що пройшли через отвори шириною 2 мм) зважувалася і розраховувалась ефективність сепарації Y за наведеною вище формулою (3.2).

Повторюваність досліджень була трикратною. Як результуюче значення приймалось середнє арифметичне значення трьох паралельних дослідів. Перед кожним повторним експериментом робоча поверхня решітного полотна очищалося від матеріалу та перевірялась відсутність забитих отворів.

3.4. Методика статистичної обробки результатів експериментальних досліджень

Статистичну обробку результатів багатофакторного експерименту проводили у програмному комплексі STATISTICA 12 (StatSoft Inc.) за загальноприйнятою методикою, описаною в [101, 103].

Послідовність статистичної обробки результатів експериментальних досліджень є наступною:

1. Перевірка відтворюваності дослідів здійснювалась за критерієм Кохрена [103, 105]. При цьому проводився розрахунок відношення максимальної дисперсії одного дослідів S_{\max}^2 до суми дисперсій усіх дослідів паралельних серій:

$$G = \frac{S_{\max}^2}{\sum S_i^2}, \quad (3.5)$$

де S_{\max}^2 – максимальна дисперсія дослідів;

$\sum S_i^2$ – сума дисперсій усіх точок.

Умовою прийнятної відтворюваності є умова $G_{\text{розр}} < G_{\text{табл}}(p, f_1, f_2)$ при обраному рівні значущості $p = 0,05(5\%)$ і відповідних числах ступенів свободи. Ступені свободи чисельника – $f_1 = n - 1$ (на 1 менше ніж кількість паралельних дослідів) та відповідно ступінь свободи знаменника $f_2 = N$, що відповідає кількості точок плану експерименту.

2. Розрахунок коефіцієнтів рівняння регресії. Коефіцієнти рівняння регресії розраховувались методом найменших квадратів за стандартними формулами для ортогонального ЦКП [106, 107]. Оцінка значущості кожного коефіцієнта здійснювалась за t -критерієм Стьюдента [108]:

$$t_{розр} = \frac{|b_i|}{S_{b_i}}, \quad (3.6)$$

де S_{b_i} – середньоквадратичне відхилення коефіцієнта регресії.

Коефіцієнт в рівнянні регресії вважається значущим, якщо $t_{розр} > t_{табл}$ при числі ступенів свободи $f = n_0 - 1 = 5$ та рівні значущості $p = 0,05(5\%)$.

3. Перевірка адекватності отриманої статистичної моделі проводилася за F -критерієм Фішера шляхом порівняння дисперсії адекватності $S_{ад}^2$ з дисперсією відтворюваності $S_{відтв}^2$:

$$F_{розр} = \frac{S_{ад}^2}{S_{відтв}^2}. \quad (3.7)$$

Отримана статистична модель є адекватною, якщо виконується умова $F_{розр} \leq F_{табл}$ при відповідних числах ступенів свободи f_1 і f_2 та рівні значущості $p = 0,05(5\%)$ [108, 109]. Коефіцієнт детермінації R^2 доповнює аналіз адекватності комплексно аналізуючи «якість» моделі. Цей показник розраховувався для оцінки частки варіації відгуку, поясненої моделлю. Його можна знайти за формулою:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_u - \hat{y}_u)^2}{\sum (y_u - \bar{y})^2}, \quad (3.8)$$

де y_u – експериментальне (дійсне) значення відгуку в u -му досліді;

\hat{y}_u – теоретичне значення, розраховане за отриманим рівнянням регресії для цього ж досліді;

$\sum (y_u - \hat{y}_u)^2$ – чисельник (залишкова сума квадратів) показує помилку моделі, і фактично ту частину варіації даних, яку отримане рівняння регресії не змогло пояснити. Таким чином, чим менше значення чисельника, тим більш точна модель;

\bar{y} – середнє арифметичне всіх експериментальних значень, $\bar{y} = \frac{1}{N} \sum y_u$;

$\sum (y_u - \bar{y})^2$ – знаменник (загальна сума квадратів) демонструє загальний розкид параметру, що досліджується по відношенню до середнього значення.

Якщо $R^2 > 0,8$ (80%), за таких умов модель є повністю придатною до практичного використання. За умови, коли $R^2 \rightarrow 1$ отримана статистична модель практично ідеально описує всі експериментальні дані.

4. Оптимізація параметрів. Для визначення раціональних значень досліджуваних факторів застосовувався метод функції бажаності Харрінгтона [101, 103]. Метод дозволяє в разі необхідності здійснювати одночасну оптимізацію декількох критеріїв шляхом їх перетворення на безрозмірну шкалу бажаності $d \in [0; 1]$ та розрахунку узагальненого показника $D = (d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_k)^{\frac{1}{k}}$. Аналіз поверхонь відгуку (Response Surface Methodology) реалізовувався графічно у вигляді тривимірних поверхонь і двовимірних перетинів при фіксації третього фактора на оптимальному рівні.

3.5. Методика порівняльних досліджень

Порівняльні дослідження ефективності модернізованих решіт та традиційних конструкцій проводились за такою методикою.

На першому етапі при раціональних значеннях параметрів, встановлених за результатами багатофакторного експерименту, послідовно випробовувались усі п'ять варіантів решітних полотен ($\beta = 0^\circ; 5^\circ; 8^\circ; 10^\circ; 11^\circ$). За кожним із варіантів встановлених решіт проводилися дослідження в п'ятикратній

повторюваності, за результатами яких визначались середні значення ефективності сепарації та їх довірчі інтервали, при рівні значущості $p = 0,05(5\%)$.

На другому кроці оцінювався вплив вологості зернового матеріалу на ефективність роботи вдосконаленого решета. З цією метою проводились досліди при трьох рівнях вологості: 12...14% (знижена); 14...16% (нормальна); 18...20% (підвищена). Вологість зернового матеріалу змінювали шляхом витримування підготовлених порцій у зволожуючій камері (підвищення вологості) або досушуванні в сушильній шафі до необхідного рівня.

Статистична значущість відмінностей між варіантами оцінювалась за критерієм Стюдента для незалежних вибірок. Практична значущість підвищення ефективності сепарації у запропонованій конструкції порівняно з традиційною ($\beta = 0^\circ$) визначалась розрахунком відносного приросту показника та його абсолютного значення.

3.6. Методика оцінки похибок вимірювань

Достовірність результатів досліджень забезпечувалась дотриманням умов вимірювань, використанням повіреної вимірювальної апаратури та застосуванням методів статистичної обробки експериментальних даних.

Відносна похибка вимірювання маси зернового матеріалу і домішок становила не більше 1% для порцій понад 10 г. Похибка визначення ефективності сепарації Y оцінювалась методом розподілу похибок [103]. Для маси домішок у межах 20...150 г (типові значення для досліджуваного матеріалу) сумарна відносна похибка $\delta Y \leq 2,5\%$.

Відтворюваність результатів контролювалась проведенням не менше трьох паралельних дослідів. Середнє квадратичне відхилення результатів паралельних дослідів у більшості серій не перевищувало 1,5% від середнього значення, що свідчить про задовільну стабільність умов проведення дослідів і достатню точність методики.

3.7. Методика встановлення збіжності результатів теоретичних та експериментальних досліджень

Ступінь збіжності результатів теоретичного аналізу та експериментальних досліджень оцінювався за двома підходами.

Перший підхід – якісна перевірка: порівняння характеру теоретично передбачених та експериментально встановлених залежностей (монотонне зростання, наявність екстремуму тощо). Зміна знаку впливу фактора або відсутність теоретично передбаченого екстремуму вважались суттєвими розбіжностями, що потребують уточнення теоретичної моделі.

Другий підхід – кількісна оцінка: розрахунок відносного відхилення теоретично розрахованих значень швидкості транспортування частинок V_m від експериментально встановлених V_e :

$$\delta = \frac{|V_m - V_e|}{V_e} \cdot 100\% . \quad (3.9)$$

Відхилення до 10% вважались задовільними; від 10 до 20% – допустимими з уточненням припущень моделі; понад 20% – суттєвими, що потребують перегляду концептуальних положень теоретичної моделі. Порівняння проводилося у п'яти репрезентативних точках факторного простору, що охоплюють весь досліджуваний діапазон змінних параметрів [103, 107, 108].

Висновки до розділу III

1. В результаті виконання розділу сформульовано мету та задачі експериментальних досліджень, що органічно пов'язані з теоретичними результатами Розділу 2. Розроблена програма включає три послідовних етапи (підготовчий, основний та аналітичний), що відповідають вимогам

до наукових досліджень зі встановлення раціональних параметрів плоского коливального решета.

2. В якості об'єкта експериментальних досліджень прийнято процес сепарації зернового матеріалу на плоскому коливальному решеті із зигзагоподібним розміщенням продовгуватих отворів. Дослідження проводились на лабораторному сепараторі Petkus Wutha K 294 A, що дозволяє відтворювати режими роботи промислових зерноочисних машин загального призначення із необхідною точністю.
3. Для проведення дослідів виготовлено п'ять варіантів решітних полотен методом лазерного різання з кутами відхилення $\beta = 0^\circ, 5^\circ, 8^\circ, 10^\circ$ та 11° , що забезпечує перекриття всього практично значущого діапазону досліджуваного геометричного параметра при стабільному коефіцієнті живого перерізу $\varepsilon = 57,1\%$.
4. Обґрунтовано вибір трьох досліджуваних факторів (питома подача x_1 , частота коливань x_2 , кут відхилення отворів x_3) та встановлено діапазони їх варіювання на основі пошукових однофакторних дослідів. В якості критерію оптимізації прийнято ефективність сепарації Y – повноту виділення домішок (прохідної фракції).
5. Застосування центрального композиційного плану другого порядку (ЦКП 2^3) дозволяє отримати адекватну математичну модель у вигляді поліному другого порядку при мінімально необхідній кількості дослідів ($N = 20$ серій, 50 запусків) із забезпеченням ортогональності та ротатабельності плану.
6. Розроблена методика передбачає комплекс статистичних перевірок (критерії Кохрена, Стьюдента та Фішера) та оптимізацію за методом функції бажаності Харрінгтона, що відповідає сучасним вимогам до математичного планування і обробки результатів досліджень у галузі сільськогосподарського машинобудування.

РОЗДІЛ ІV

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Теоретичні дослідження, що наведені в Розділі 2 роботи, дозволили встановити аналітичні залежності між конструктивними параметрами плоского коливального решета із зигзагоподібним розміщенням продовгуватих отворів і кінематичними характеристиками руху зернових частинок, а також дозволили аналітично довести доцільність збільшення кута відхилення осей отворів від поздовжньої осі решета. Однак, отримана математична модель, розроблена на основі ряду припущень, які не дозволяють повністю врахувати характеру руху решітного стану, взаємодію між сусідніми частинками зернової суміші та варіативність коефіцієнтів тертя й опору залежно від товщини шару матеріалу на решеті під час сепарації. Тому експериментальна перевірка отриманих теоретичних результатів та оцінка дійсних показників ефективності роботи вдосконаленого решета є наступним і завершальним етапом даного наукового дослідження [101, 103, 109], що дозволить отримати практичні рекомендації відносно конструкції і режимів роботи розробленого решета.

В даному розділі представлено повний об'єм результатів проведених експериментальних досліджень процесу сепарації зерна пшениці на плоскому коливальному решеті із зигзагоподібним розміщенням отворів, що реалізовані відповідно до програми та методики, описаної у Розділі 3. Наведено результати проведених пошукових дослідів, побудовано візуалізацію верифікованих регресійних моделей другого порядку, проведено аналіз поверхонь відгуку і інших графічних результатів експериментів та визначено раціональні параметри роботи оригінального решета з зигзагоподібно розташованими продовгуватими отворами, проведено порівняння роботи різних конструкцій решітних частин зерноочисних машин. Крім того, шляхом проведення експериментів встановлено ступінь адекватності результатів теоретичних досліджень реальному процесу.

4.1. Результати пошукових досліджень

Загальна ефективність решітної сепарації зернових сумішей Y залежить від великої кількості факторів, що можна умовно віднести до трьох груп:

- конструктивних параметрів решета (форма і розміри отворів, кут відхилення отворів β від вісі решета, матеріал виготовлення і товщина решітного полотна);
- кінематичних параметрів механізму приводу (частота n , амплітуда A коливань);
- технологічних і вихідних умов (питома подача зернового матеріалу q_b , кут нахилу решітного стану α , вологість W і засміченість зернового матеріалу).

Одночасне варіювання всіх перелічених факторів у межах одного повноцінного факторного плану експерименту є неможливим через надто велику кількість досліджень, яка б призвела до тривалого і ресурсоемкого експерименту. Тому перший етап – пошуковий, який мав на меті виявлення найбільш впливових чинників на процес сепарації зернових матеріалів вдосконаленим решетом і фіксацію другорядних на обґрунтованих рівнях [101, 103, 106].

Всього розглянуто п'ять потенційних факторів, зміни значень яких впливають на повноту виділення прохідної фракції решітною робочою поверхнею.

Для попереднього ранжування факторів використано класичний метод однофакторних пошукових досліджень [103], відповідно до якого проводили оцінку впливу кожного фактора в повному практично значимому діапазоні його значень за умови незмінних (фіксованих на базовому рівні) значеннях усіх інших факторів. Базові (фіксовані) значення факторів були прийняті наступними: питома подача зернового матеріалу – $q_b = 1150$ кг/(дм·год); частота коливань решітного стану – $n = 400$ коливань/хв; кут відхилення осей

отворів решета від осі решета – $\beta = 5^\circ$; кут нахилу решітного стану – $\alpha = 8^\circ$. Діапазон зміни вологості зернового матеріалу був незначний $W = 13,5...16,2\%$, що відповідає природньому значенню для озимої пшениці після її збирання з поля методом прямого комбайнування [3]. Амплітуда коливань у всіх дослідах була незмінною $A = 16$ мм.

Переліки факторів, їх позначення та результати ранжування зведені до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Перелік факторів та результати їх попереднього ранжування

№	Фактор	Позначення	Одиниці вимір.	Мін.	Макс.	Вплив (ранг)	Включено до ЦКП
1	Питома подача зернового матеріалу	q_b	кг/(дм·год)	600	1700	1	Так
2	Частота коливань решітного стану	n	кол/хв	200	600	2	Так
3	Кут відхилення осей отворів від осі решета	β	градус	0	11	3	Так
4	Кут нахилу решітного стану	α	градус	6	10	4	Ні
5	Вологість зернового матеріалу	W	%	13,5	16,2	5	Ні

Аналіз даних, наведених в таблиці 4.1 свідчить, що три чинники – питома подача зернового матеріалу q_b , частота коливань n і кут відхилення осей отворів β – мають найвищий ранг впливу і підлягають подальшому більш детальному вивченню в рамках центрального композиційного плану. Кут нахилу решітного стану α під час досліджень фіксується на рівнях, що забезпечуються конструктивом лабораторного сепаратора Petkus Wutha K 294A.

Вологість матеріалу W залежить від конкретного зернового матеріалу, який потрапляє на обробку.

Вплив вологості та засміченості вихідної зернової суміші на ефективність роботи вдосконаленого решета вивчатиметься в рамках додаткових досліджень (підрозділ 4.6).

Кожен із трьох факторів, які включено до ЦКП варіювався окремо при фіксованих значеннях інших факторів, що знаходились на нульовому рівні. Кожна точка плану відтворювалась тричі, а за розрахунковий результат приймалося середнє арифметичне за умови, що різниця між паралельними дослідями не перевищувала 10% [105].

Результати визначення впливу питомої подачі матеріалу на ефективність сепарації наведено нижче (табл. 4.2, рис. 4.1). Питому подачу матеріалу при проведенні пошукових експериментів змінювали у діапазоні від 600 до 1700 кг/(дм·год) при фіксованих значеннях частоти коливань $n = 400$ колив/хв та кута відхилення осей отворів $\beta = 5^\circ$. Отримані результати підтвердили, що у діапазоні питомої подачі зерна на рівні $q_b = 600 \dots 800$ кг/(дм·год) ефективність сепарації є порівняно стабільною і знаходиться у межах 72...74%, оскільки при малих подачах зерновий шар є тонким ($\leq 2-3$ зернини), частки рівномірно орієнтуються у площині отворів і з високою ймовірністю без перешкод просіюються крізь ці отвори. Зі збільшенням питомої подачі до 900...1100 кг/(дм·год) ефективність сепарації знижується до рівня 69...72%, що пов'язано із збільшенням товщини шару зернового матеріалу на решеті і, відповідно, зростанням сили опору шару [40].

Подальше збільшення подачі понад 1200...1500 кг/(дм·год) призводить до більш відчутного зниження ефективності сепарації до 55...63%, оскільки значна товщина шару матеріалу суттєво обмежує переміщення прохідних часток до поверхні решета та, відповідно їх контакт із отворами. На підставі отриманих результатів встановлено, що раціональний діапазон варіювання питомої подачі для основного центрального композиційного плану експерименту встановлено в межах $q_b = 800 \dots 1500$ кг/(дм·год), що охоплює практично всю область навантаження плоских решіт зерноочисних машин

загального призначення [4, 33] і дозволяє виявити нелінійний характер залежності.

Таблиця 4.2

Залежність повноти розділення від питомої подачі ($n = 400$ колив/хв, $\beta = 5^\circ$)

Питома подача q_b , кг/(дм·год)	600	800	1000	1200	1400	1600
Повнота розділення Y , %	73,4	72,1	70,8	67,2	61,9	56,4
Середньоквадратичне відхилення σ , %	1,8	1,6	1,9	2,1	2,4	2,7

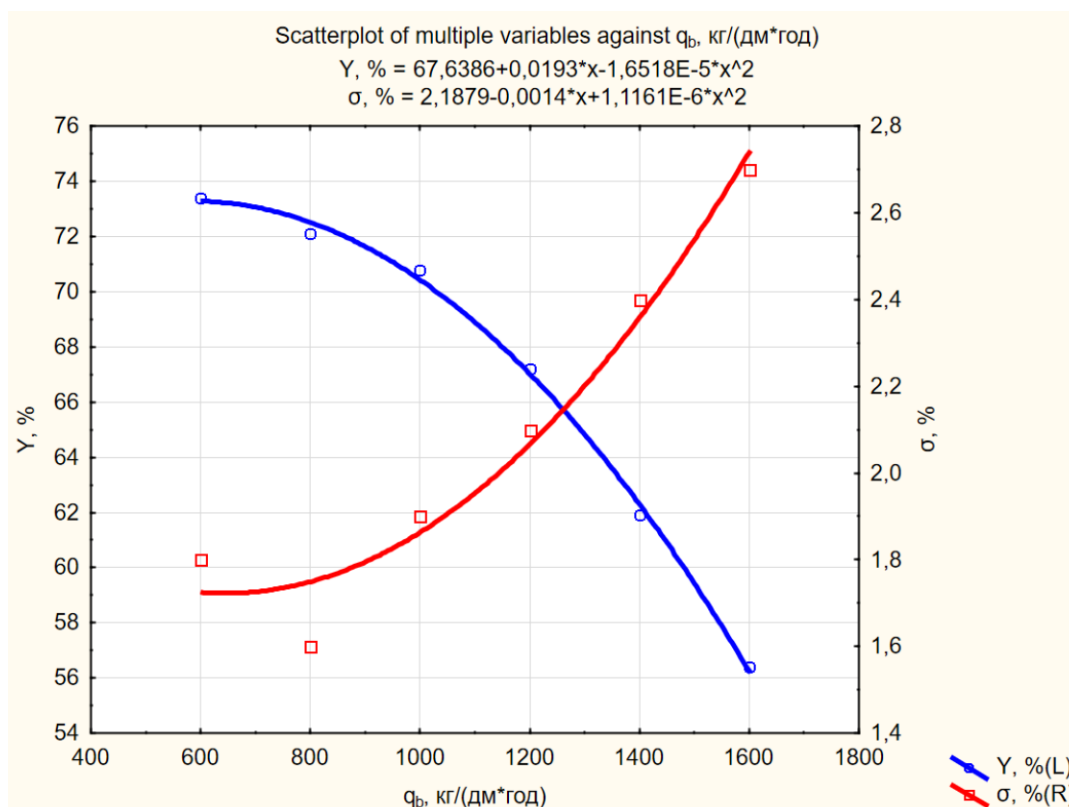


Рис. 4.1. Вплив питомої подачі матеріалу на ефективність сепарації при фіксованих значеннях частоти коливань $n = 400$ колив/хв та кута відхилення осей отворів $\beta = 5^\circ$

Результати визначення впливу частоти коливань на ефективність сепарації наведено нижче (табл. 4.3, рис. 4.2). Частоту коливань решітного стану лабораторного сепаратора змінювали від 200 до 600 колив/хв при фіксованих значеннях $q_b = 1150$ кг/(дм·год) та $\beta = 5^\circ$. У діапазоні частоти коливань $n = 200 \dots 300$ колив/хв ефективність сепарації зернової суміші

залишається відносно низькою та не перевищує 55...60%. Такий показник ефективності сепарації пояснюється тим, що за умов недостатньої частоти коливань решіт, зерновий матеріал не набуває необхідної кінетичної енергії для вертикального перемішування і вертикальної сегрегації прохідних часток [64]. За умови, що частота коливань збільшується до $n = 350...480$ колив/хв спостерігається зростання ефективності сепарації до 68...76% – саме у цьому діапазоні забезпечується оптимальне співвідношення між інтенсивністю вертикального перемішування і часом перебування матеріалу в активній зоні решета. При подальшому збільшенні частоти коливань понад 500 колив/хв ефективність сепарації починає знижуватись у зв'язку із скороченням часу контакту частки з отвором та збільшенням інтенсивності забивання отворів частками, що мають розміри, близькі до ширини щілини [61]. Діапазон варіювання для ЦКП-експерименту встановлено в інтервалі значень $n = 300...500$ колив/хв.

Таблиця 4.3

Залежність повноти розділення від частоти коливань

$$(q_b = 1150 \text{ кг/(дм}\cdot\text{год)}, \beta = 5^\circ)$$

Частота коливань n , колив/хв	200	250	300	400	480	550	600
Повнота розділення Y , %	53,2	58,6	63,8	71,7	74,3	71,1	67,4
Середньоквадратичне відхилення σ , %	2,1	1,9	1,8	1,6	1,5	1,8	2,2

Результати пошукового дослідження з визначення впливу кута відхилення осей отворів на ефективність сепарації наведено нижче (табл. 4.4, рис. 4.3). Кут відхилення β змінювався від 0° до 11° при фіксованих $q_b = 1150$ кг/(дм·год) та $n = 400$ колив/хв. За умови, коли кут нахилу отворів становить $\beta = 0^\circ$ (класична конструкція решета з паралельними отворами) ефективність сепарації складає 58...62%, що відповідає теоретично спрогнозованому значенню ймовірності потрапляння часток у площину отворів близько 50...60% за наявності суттєвих «мертвих зон» на поздовжніх перетинках [40, 111]. Зі

збільшенням кута нахилу отворів β від 0° до 5° ефективність сепарації зростає до 60...75%, що підтверджує гіпотезу щодо активізації поперечних переміщень часток у площині зигзагоподібних отворів.

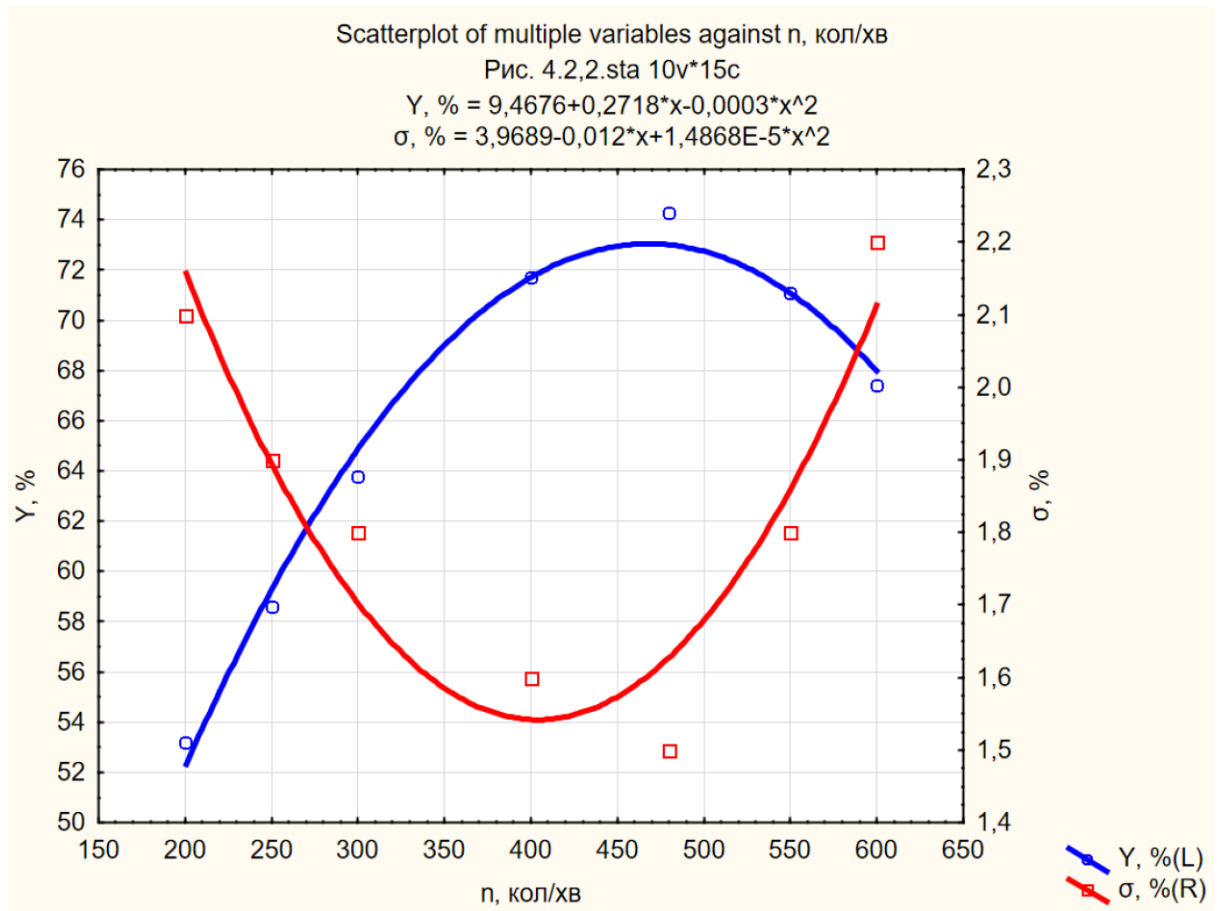


Рис. 4.2. Вплив частоти коливань на ефективність сепарації при фіксованих значеннях $q_b = 1150$ кг/(дм·год) та $\beta = 5^\circ$

При $\beta = 5...8^\circ$ досягаються максимальні значення ефективності сепарації на рівні 75...78%, що практично відповідає теоретично передбаченому значенню гарантованого потрапляння часток в площину отворів ($\beta_{кр} \approx 4,6^\circ$ – Розділ 2) та формально забезпечує виконання умови гарантованого просіювання при критичному куті. При $\beta = 10...11^\circ$ показник ефективності сепарації знижується, що може бути пов'язано із надмірним відхиленням осей отворів, що збільшує опір руху зернового матеріалу по робочій поверхні решета у поздовжньому напрямку. Встановлено діапазон варіювання кута нахилу отворів решета для ЦКП $\beta = 0...10^\circ$.

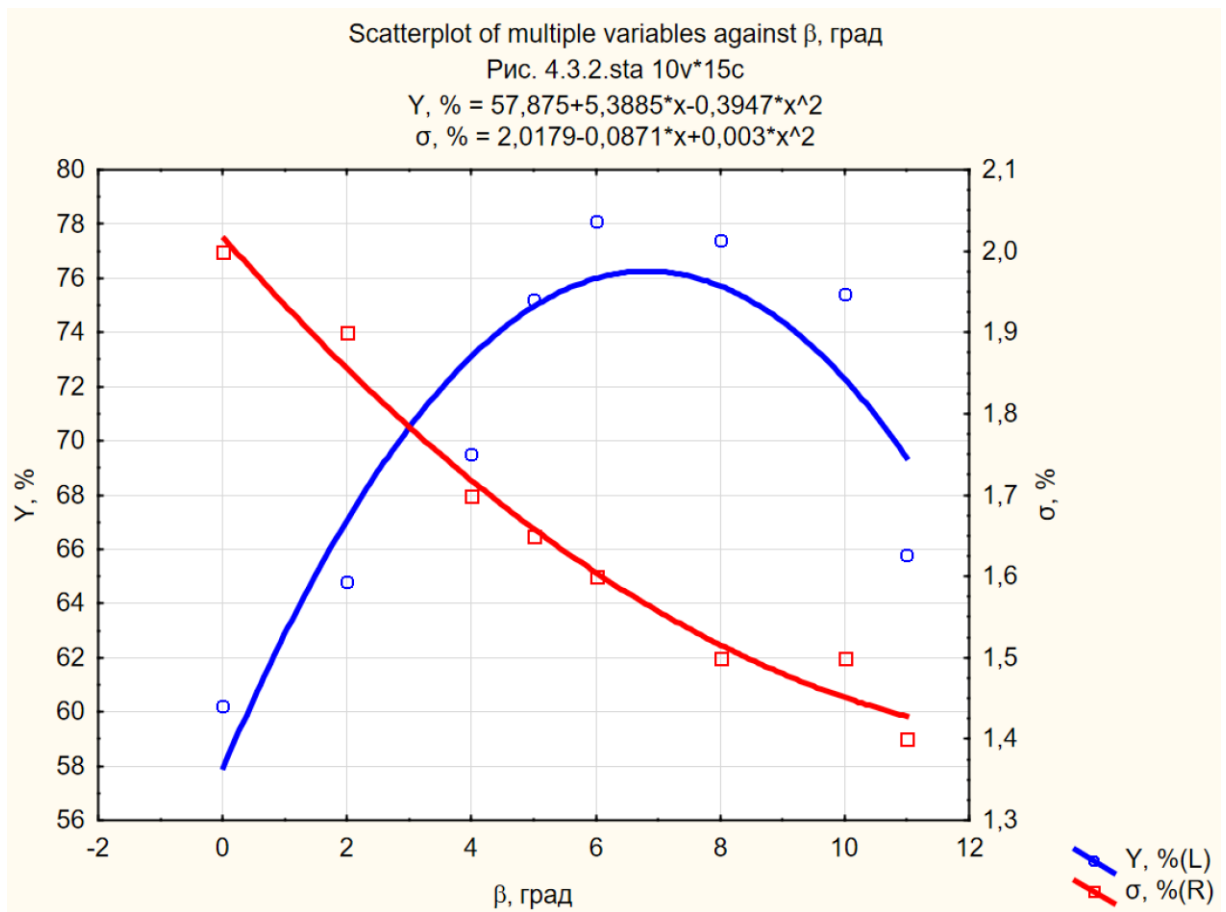


Рис. 4.3. Вплив кута відхилення осей отворів на ефективність сепарації при фіксованих $q_b = 1150$ кг/(дм·год) та $n = 400$ колив/хв

Таблиця 4.4

Залежність повноти розділення від кута відхилення отворів від вісі решета ($q_b = 1150$ кг/(дм·год), $n = 400$ колив/хв)

Кут відхилення β , °	0	2	4	5	6	8	10	11
Ефективність Y , %	60,2	64,8	69,5	75,2	78,1	77,4	75,4	65,8
Середньоквадратичне відхилення σ , %	2,0	1,9	1,7	1,65	1,6	1,5	1,5	1,4

Отже, проведені пошукові дослідження підтвердили, що в межах обраних діапазонів варіювання, найбільш впливовими серед досліджуваних факторів є питома подача, частота коливань і кут відхилення отворів від вісі решета. При цьому слід відзначити, що вплив питомої подачі зернового матеріалу і частоти коливань є найбільш значущими і відчутними в діапазоні великих навантажень на робочу поверхню решета.

Наявність в усьому діапазоні навантажень позитивного ефекту при застосуванні оригінального решета з відхиленням отворів β від поздовжньої вісі доводить істинність висловленої первинної гіпотези і вказує на перспективність підвищення ефективності сепарації плоскорешітних коливальних систем.

Результати однофакторних дослідів цілком узгоджуються з теоретичними передумовами, викладеними вище у Розділі 2.

4.2. Реалізація центрального композиційного плану другого порядку, статистична обробка даних, верифікація регресійної моделі і рівняння регресії

Використовуючи результати пошукового етапу експерименту та відповідно до методики [106] і програми експериментальних досліджень (Розділ 3), побудовано матрицю центрального композиційного плану другого порядку ЦКП 2^3 із зірковими точками ($\alpha=1,682$).

Фактори повного факторного експерименту, їх позначення та рівні варіювання наведено в таблиці 3.4.

Загальна кількість дослідів ЦКП 2^3 + зіркові точки складає:

$$N = 2^3 + 2 \cdot 3 + n_0 = 8 + 6 + 6 = 20, \quad (4.1)$$

де $n_0 = 6$ – кількість повторностей дослідів у центрі плану (на нульовому рівні значимості факторів).

Таке число центральних точок є достатнім для незалежного оцінювання дисперсії відтворюваності. Для забезпечення достатньої надійності, кожний дослід під час проведення експериментальних досліджень проводився у трикратній повторності і, для розрахунку приймалося середнє значення за умови, що різниця між паралельними дослідями не перевищував 10% від середнього значення [101, 105].

Матриця планування експерименту та зведені результати вимірювань ефективності сепарації наведені у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5

Матриця планування ЦКП 2^3 -зіркові точки та результати визначення ефективності сепарації

№	x_1	x_2	x_3	q_b , кг/(дм·год)	n , кол/хв	β , °	Y_1	Y_2	Y_3	\bar{Y} , %
1	-1	-1	-1	800	300	0	56,2	55,8	56,6	56,2
2	+1	-1	-1	1500	300	0	58,4	59,1	58,9	58,8
3	-1	+1	-1	800	500	0	60,8	60,2	61,4	60,8
4	+1	+1	-1	1500	500	0	62,3	61,7	62,8	62,3
5	-1	-1	+1	800	300	10	73,1	72,8	73,6	73,2
6	+1	-1	+1	1500	300	10	67,9	68,4	67,4	67,9
7	-1	+1	+1	800	500	10	76,8	77,2	76,4	76,8
8	+1	+1	+1	1500	500	10	74,2	74,8	73,6	74,2
9	-1,682	0	0	560	400	5	57,6	56,9	58,3	57,6
10	+1,682	0	0	1740	400	5	61,4	60,8	62,0	61,4
11	0	-1,682	0	1150	232	5	62,3	61,7	62,9	62,3
12	0	+1,682	0	1150	568	5	66,8	67,3	66,3	66,8
13	0	0	-1,682	1150	400	-3,4	54,1	53,6	54,8	54,2
14	0	0	+1,682	1150	400	13,4	76,4	75,8	77,0	76,4
15	0	0	0	1150	400	5	71,3	71,8	70,8	71,3
16	0	0	0	1150	400	5	72,1	71,6	72,6	72,1
17	0	0	0	1150	400	5	70,9	71,4	70,4	70,9
18	0	0	0	1150	400	5	71,8	72,3	71,3	71,8
19	0	0	0	1150	400	5	71,5	71,0	72,0	71,5
20	0	0	0	1150	400	5	72,4	72,9	71,9	72,4

Перед побудовою регресійної моделі роботи решітної сепарації виконано перевірку однорідності дисперсій паралельних дослідів за критерієм Кохрена.

Критерій перевіряє гіпотезу H_0 про однорідність дисперсій, використовуючи відому формулу (3.5) [106, 108].

Обчислення залежності (3.5) виконані для центральних точок плану (досліди №15...20), де є можливість незалежного оцінювання дисперсії відтворюваності. Значення S^2 для кожного з шести центральних дослідів складає 0,25; 0,25; 0,25; 0,25; 0,25; 0,25. Розрахункове значення критерію Кохрена склало $G_{розр} = 0,241$. Табличне значення $G_{табл} = 0,391$ при рівні значущості $\alpha = 0,05$, числі ступенів свободи $f_1 = 2$ (для трьох повторень) і $f_2 = 6$ (кількість центральних точок). Оскільки $G_{розр} = 0,241 < G_{табл} = 0,391$, гіпотеза про однорідність дисперсій підтверджується, і відтворюваність дослідів вважається достатньою [105, 107].

Обробку матриці планування експериментальних досліджень проведено методом найменших квадратів у пакеті програм STATISTICA 12. Рівняння регресії другого порядку для $k = 3$ фактори має загальний вигляд (3.3). Оцінку коефіцієнтів рівняння регресії за рівнем їх статистичної значущості за t-критерієм Стьюдента [105, 106, 107] наведено у таблиці 4.6.

Аналіз даних, наведених в таблиці 4.6 підтверджує, що дев'ять із десяти коефіцієнтів рівняння регресії є статистично значущими при рівні значущості $\alpha = 0,05$. Виняток становить коефіцієнт попарної взаємодії $b_{12} = -0,62$, значення якого не перевищує критичної межі:

$$\left(\left| \frac{b_{12}}{\Delta b_{12}} \right| \right) = 1,77 < t_{табл} = 2,14.$$

Таким чином, взаємодія між питомою подачею зернового матеріалу на очищення і частотою коливань решітного стану $(x_1 x_2)$ є статистично незначущою, що означає відсутність взаємного посилення або послаблення

впливу цих двох факторів у досліджуваній факторній площині. Незначущий коефіцієнт виключений із загального рівняння регресії [106].

Таблиця 4.6

Коефіцієнти регресійної моделі та результати перевірки їх статистичної значущості

Коефіцієнт	Значення b_i	Δb_i	$\left \frac{b_i}{\Delta b_i} \right $	$t_{табл}$ ($\alpha=0,05$)	p-value
b_0 – вільний член	71,67	0,38	188,6	2,14	<0,001
b_1 – питома подача	2,18	0,29	7,52		<0,001
b_2 – частота коливань	2,71	0,29	9,34		<0,001
b_3 – кут відхилення β	7,09	0,29	24,45		<0,001
b_{12} – взаємодія x_1x_2	-0,62	0,35	1,77		0,101
b_{13} – взаємодія x_1x_3	-1,46	0,35	4,17		0,002
b_{23} – взаємодія x_2x_3	1,25	0,35	3,57		0,005
b_{11} – квадр. x_1^2	-2,91	0,27	10,78		<0,001
b_{22} – квадр. x_2^2	-1,98	0,27	7,33		<0,001
b_{33} – квадр. x_3^2	-3,17	0,27	11,74		<0,001

Після виключення із рівняння регресії незначущого коефіцієнта b_{12} кінцева регресійна модель у кодованих значеннях факторів має наступний вигляд:

$$Y = 71,67 + 2,18x_1 + 2,71x_2 + 7,09x_3 - 1,46x_1x_3 + 1,25x_2x_3 - 2,91x_1^2 - 1,98x_2^2 - 3,17x_3^2, \quad (4.2)$$

де Y – прогнозована ефективність сепарації, %;

x_1, x_2, x_3 – кодовані значення питомої подачі, частоти коливань і кута відхилення отворів відповідно.

Отримане рівняння (4.2) є статистичною математичною моделлю процесу сепарації зерна на плоскому коливальному решеті із зигзагоподібним розміщенням отворів у безрозмірному (кодованому) вигляді. Це рівняння зручне для якісного аналізу і порівняння відносного впливу факторів та на базі нього зручно будувати поверхні відгуку і лінії рівного виходу попарного впливу факторів на критерій оптимізації.

З метою практичного використання рівняння регресії для проектування та налаштування решітних зерноочисних машин із зигзагоподібним розміщенням отворів виконано зворотнє перекодування факторів:

$$X_1 = \frac{q_b - 1150}{350}; \quad X_2 = \frac{n - 400}{100}; \quad X_3 = \frac{\beta - 5}{5}. \quad (4.3)$$

Після підстановки виразів (4.3) у рівняння (4.2) і проведення розрахунків і перетворень отримано рівняння регресії у натуральних значеннях факторів:

$$Y = -32,14 + 0,0624 \cdot q_b + 0,2710 \cdot n + 15,34 \cdot \beta - 0,000834 \cdot q_b \cdot \beta + \\ + 0,00250 \cdot n \cdot \beta - 0,0000238 \cdot q_b^2 - 0,000198 \cdot n^2 - 0,1268 \cdot \beta^2, \quad (4.4)$$

де q_b – питома подача матеріалу, кг/(дм·год);

n – частота коливань решета, кол/хв;

β – кут відхилення осей отворів решета, град.

Рівняння (4.4) дає можливість проводити безпосереднє прогнозування ефективності сепарації зернового матеріалу Y для будь-якої комбінації значень факторів у діапазонах: $q_b \in 800 \dots 1500$ кг/(дм·год), $n \in 300 \dots 500$ коливань/хв та $\beta \in 0 \dots 10^\circ$ без попереднього перекодування факторів. Розрахункова відносна похибка прогнозу у межах досліджуваного факторного простору менше 4,2%.

Для перевірки адекватності регресійної моделі виконано дисперсійний аналіз за F -критерієм Фішера, результати якого зведено до таблиці 4.7.

Результати дисперсійного аналізу за F -критерієм Фішера

Джерело варіювання	SS	df	MS	$F_{розр}$	$F_{табл}$ ($\alpha=0,05$)	Висновок
Регресія	1 041,8	9	115,8	42,6	3,02	Адекватна
Залишок	54,3	10	5,4	–	–	–
Відтворюваність (центр плану)	4,8	5	0,96	–	–	–
Нев'язка	49,5	5	9,9	–	–	–
Загальне	1 096,1	19	–	–	–	–
$R^2 = 0,950$; $R^2_{adj} = 0,905$; $G_p = 0,241 < G_T = 0,391$						Модель адекватна

Отже, отримане розрахункове значення критерію Фішера $F_{розр} = 42,6$, що значно перевищує табличне значення $F_{табл} = 3,02$ (за рівня значущості $\alpha = 0,05$, кількості ступенів свободи чисельника $f_1 = 9$ та знаменника $f_2 = 10$), що повністю підтверджує адекватність отриманої регресійної моделі [105, 106]. Коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,950$ доводить те, що 95% загальної варіації критерію оптимізації доповнено введеними до статистичної моделі факторами та їх взаємодіями. Скоригований коефіцієнт детермінації $R^2_{adj} = 0,905$ підтверджує відсутність надмірного ускладнення математичної моделі, яка описує процес сепарації зернових матеріалів на запропонованому решеті.

Для перевірки відповідності залишків регресії нормальному закону розподілу виконано аналіз за критерієм Шапіро-Уїлка [108]. Отримане значення складає $W = 0,958$, яке є більшим за критичне $W_{0,05} = 0,905$ при $n = 20$, що повністю підтверджує нормальність розподілу залишків і правомірність використання параметричних критеріїв перевірки моделі [108].

4.3. Аналіз графічних результатів статистичної математичної моделі

З метою візуального відображення попарного впливу комбінації факторів на критерій оптимізації (ефективність сепарації) та пошуку зон раціональних значень факторів побудовані тримірні поверхні відгуку і лінії рівного виходу (рис. 4.4, рис. 4.5, рис. 4.6). Аналіз поверхонь відгуку виконувався по чергову для кожної пари діючих факторів із фіксованим значенням третього на нульовому рівні.

Поверхня відгуку попарного впливу «питома подача – частота коливань» (рис. 4.4) за умови, що кут нахилу отворів решіт $\beta = 5^\circ$ має вигляд параболоїда зі слабо вираженим максимумом у зоні питомої подачі на рівні $q_b \approx 930 \dots 980$ кг/(дм·год) і частоти коливань $n = 435 \dots 468$ кол/хв.

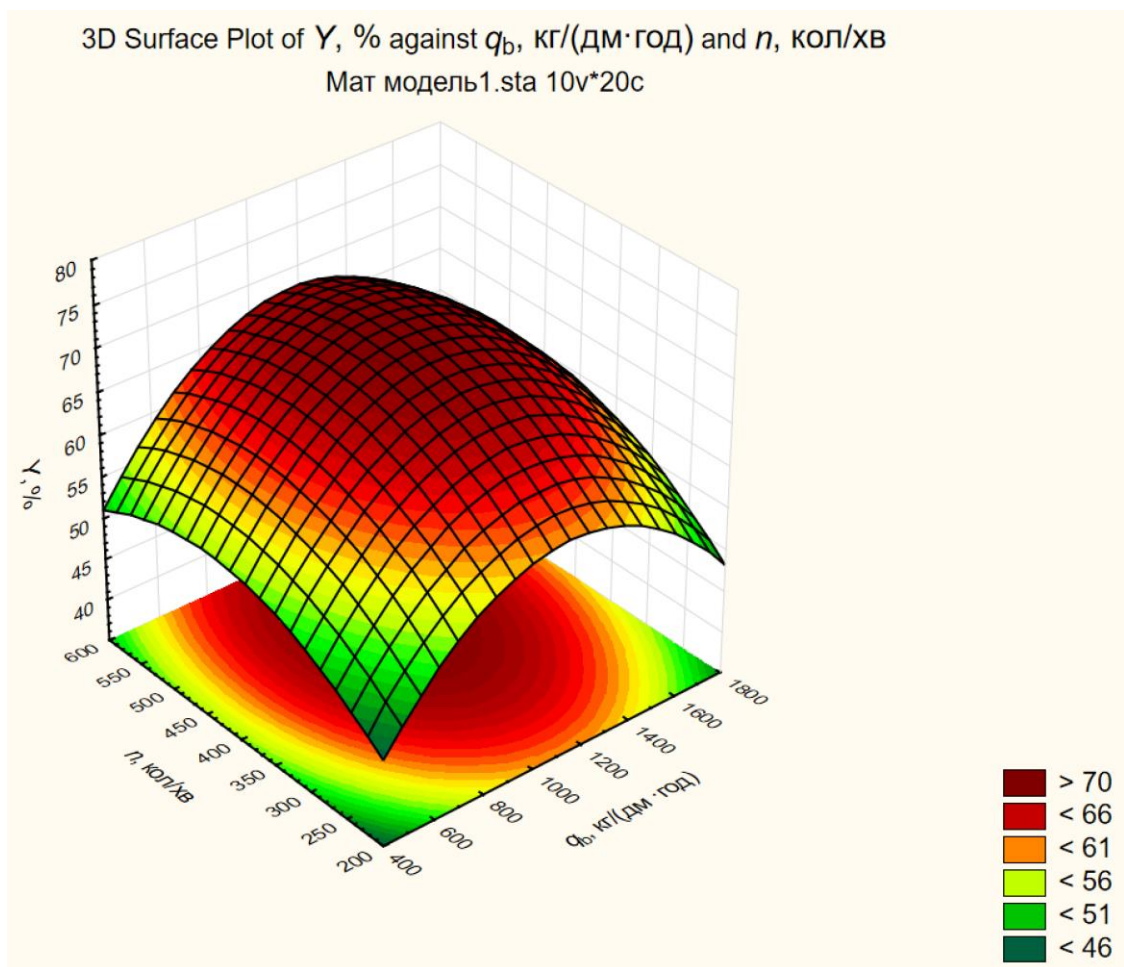


Рис. 4.4. Поверхня відгуку та лінії рівного виходу попарного впливу питомої подачі q_b та частоти коливань n на ефективність сепарації Y

Аналіз наведеного графіку (рис. 4.4) дозволяє встановити максимальне прогнозоване значення ефективності при фіксованому куті нахилу отворів решіт $\beta = 5^\circ$, що складає 73...74%. Варто зазначити, що спадання ефективності сепарації при збільшенні питомої подачі q_b понад 1100...1200 кг/(дм·год) відбувається більш стрімко, ніж при зменшенні подачі менше 900 кг/(дм·год). Такий характер спадання ефективності свідчить про асиметричний вигляд поверхні і більшу чутливість процесу сепарації зернового матеріалу решетом при його перевантаженні. На етапі аналізу результатів статистично незначущий ефект взаємодії b_{12} (виключений з моделі) підтверджується симетричною формою ізоліній у площині $x_1; x_2$ без різко виражених нахилів.

Поверхня відгуку у площині «питома подача – кут відхилення отворів решіт» (рис. 4.5), за умови, що частота коливань $n = 400$ коливань/хв є більш інформативним графічним відображенням попарного впливу факторів.

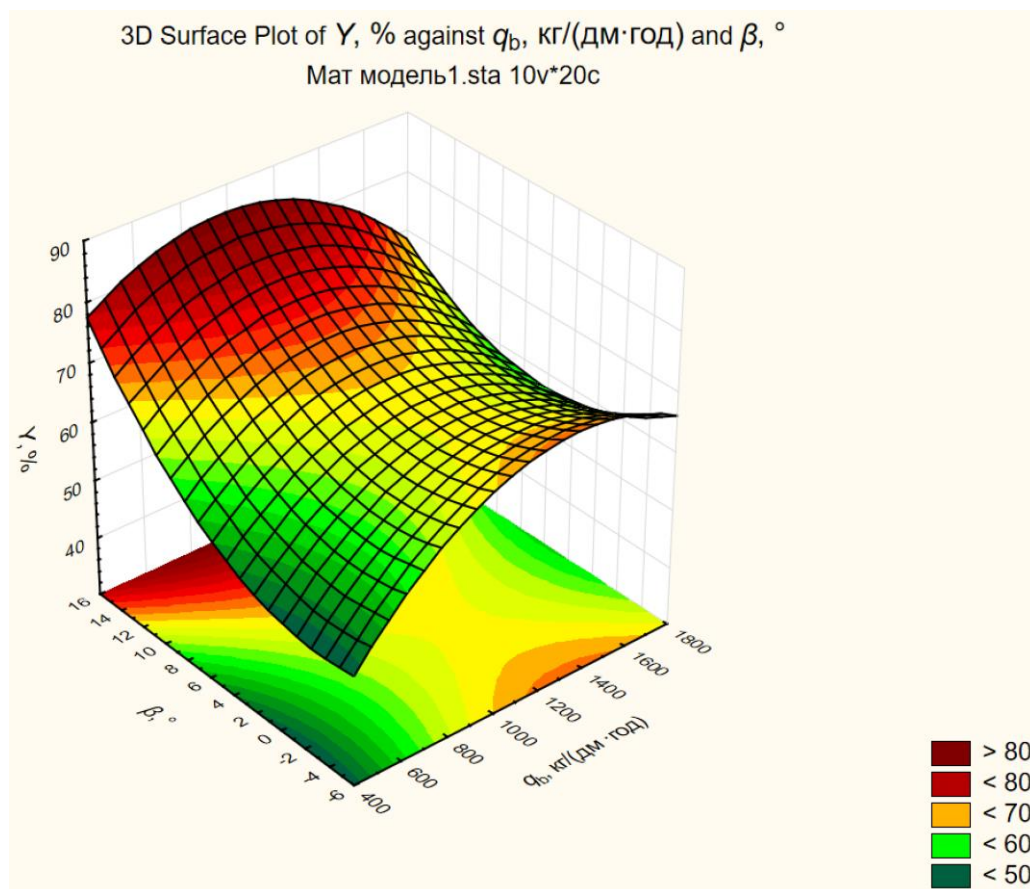


Рис. 4.5. Поверхня відгуку та лінії рівного виходу попарного впливу питомої подачі q_b та кута відхилення осей отворів β на ефективність сепарації Y

Отримана залежність впливу питомої подачі q_b та кута відхилення осей отворів β на ефективність сепарації Y виявляє суттєвий вплив на процес розділення такого фактора як кут відхилення отворів β від вісі решета. Зазначена поверхня відгуку (рис. 4.5) має вигляд опуклого параболоїду зі зміщеним максимумом у бік великих значень $\beta \approx 9...10^\circ$ і помірних значень питомої подачі зернового матеріалу $q_b \approx 850...1000$ кг/(дм·год).

Ефект від'ємної взаємодії $b_{13} = -1,46$ відображається у нахилі максимального перегину поверхні: при зростанні питомої подачі q_b раціональне значення кута відхилення отворів від вісі решета зміщується у бік менших значень $\beta = 8...9^\circ$, тоді як при зменшенні навантаження раціональний кут прямує до 10° .

Таким чином, можна відмітити, що за умови роботи решета із підвищеним зерновим навантаженням потрібно дещо зменшувати кут нахилу зигзагоподібних отворів для уникнення збільшення опору поздовжньому руху матеріалу по робочій поверхні решета.

Поверхня відгуку «частота коливань – кут відхилення» (рис. 4.6), за умови питомої подачі $q_b = 1150$ кг/(дм·год) демонструє позитивну взаємодію між частотою коливань і кутом відхилення осей отворів ($b_{23} = +1,25$). Доведено, що підвищення частоти коливань n підвищує ефективність роботи решета із зигзагоподібним розміщенням отворів, що пояснюється більш активним вертикальним і поперечним переміщенням зернового матеріалу по робочій поверхні, що забезпечує підвищення ймовірності орієнтування прохідних частинок у площині нахилених отворів [102, 111]. Максимум ефективності на зазначеній поверхні відгуку до 85% досягається при частоті коливань $n = 450...500$ колив/хв при куті відхилення осей отворів $\beta = 9...10^\circ$. Форма ізоліній на карті рівних виходів ефективності є витягнутою по діагоналі від нижнього лівого до верхнього правого кута площини $x_2; x_3$, що підтверджує сумісний характер взаємодії між цими двома факторами.

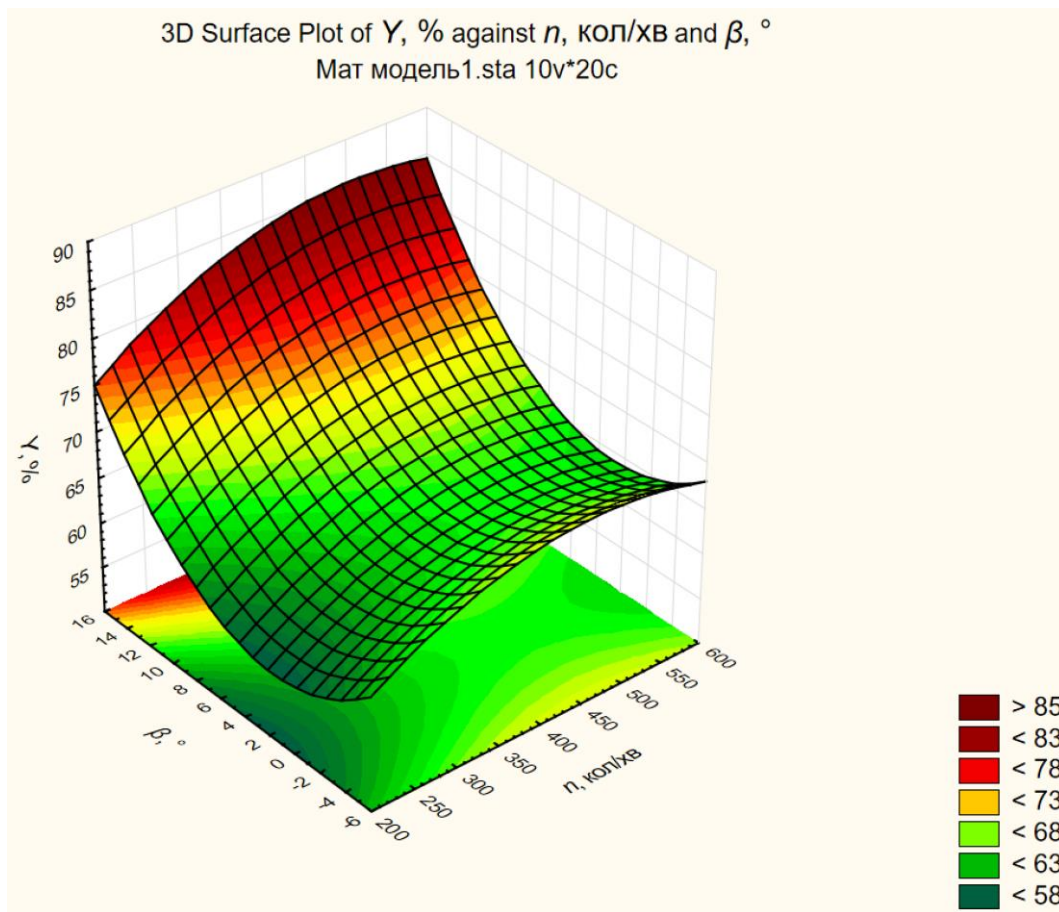


Рис. 4.6. Поверхня відгуку та лінії рівного виходу попарного впливу кута відхилення осей отворів β та частоти коливань n на ефективність сепарації Y

Таким чином, на основі проведеної реалізації центрального композиційного плану та обробки результатів доведено, що кут відхилення осей отворів β є важливим фактором, який може забезпечити інтенсифікацію процесу решітної сепарації на плоских коливальних решетах.

Слід відмітити, що в ході експериментальних досліджень виявлено позитивний зв'язок між кутом відхилення осей отворів β та частотою коливань n і від'ємна взаємодія між кутом відхилення осей отворів β та питомою подачею q_b . Описані закономірності є важливими під час практичного проектування решітних частин зерноочисних машин і налаштування раціональних режимів їх функціонування.

4.4. Визначення раціональних параметрів моделі за методом функції бажаності Харрінгтона

Для визначення комплексного оптимуму параметрів роботи решета із зигзагоподібними отворами застосовано метод узагальненої функції бажаності Харрінгтона [106, 108], який дозволяє звести до єдиного показника кілька часткових критеріїв, виражених у різних одиницях і з різними пріоритетами.

Часткова функція бажаності d_i для кожного критерію приймає значення від 0 (абсолютно небажаний результат) до 1 (ідеальний результат). Рівняння трансформації окремого відгуку в безрозмірну шкалу бажаності проводилася із використанням виразу [108]:

$$d_i = \exp \left[-\exp \left(-\left(\frac{Y_i - Y_{\min}}{Y_{\max} - Y_{\min}} \cdot 20 - 10 \right) \right) \right]. \quad (4.5)$$

Вираз $\left(\frac{Y_i - Y_{\min}}{Y_{\max} - Y_{\min}} \cdot 20 - 10 \right)$ – є лінійним перетворенням якісного показника у кодовану зміну y_i в інтервалі від -10 до +10. Це дозволяє «розтягнути» значення для експоненти, що дозволяє чітко розмежувати вдалі та невдалі режими роботи запропонованого решета.

Узагальнена функція бажаності розраховується як середнє геометричне:

$$D = \sqrt[3]{d_1 \cdot d_2 \cdot d_3}. \quad (4.6)$$

При формуванні часткових функцій бажаності враховувалися такі вимоги:

- максимізація ефективності сепарації Y ($d_1 \rightarrow 1$ при $Y \rightarrow \max$);
- забезпечення питомої подачі не нижче 900 кг/(дм·год) ($d_2 \geq 0,80$);

- обмеження частоти коливань решета у межах, які забезпечують надійну та безвідмовну роботу підшипникових вузлів механізму приводу ($n \leq 500$ колів/хв);
- обмеження кута відхилення осей отворів $\beta \leq 10^\circ$ з міркувань конструктивної міцності решітного полотна та виключення зниження швидкості руху часток під час руху робочою поверхнею.

Результати оптимізації методом функції бажаності Харрінгтона зведено до таблиці 4.8, профілі часткових функцій бажаності Харрінгтона відображено на рис. 4.7.

Таблиця 4.8

Раціональні параметри роботи решета із зигзагоподібним розміщенням отворів, визначені за методом функції бажаності Харрінгтона

Параметр	Одиниці вимірювання	Раціональний діапазон	Оптимальне значення	Функція бажаності d_i
Питома подача q_b	кг/(дм·год)	850...1050	950	0,88
Частота коливань n	кол/хв	440...490	465	0,85
Кут відхилення отворів β	град.	8,5...10,0	9,5	0,97
Узагальнена функція D	–	–	–	0,90
Прогнозована ефективність Y	%	–	$79,8 \pm 2,2$	–

Отже, отримане значення узагальненої функції бажаності $D = 0,90$ відповідає оцінці «відмінно» за шкалою Харрінгтона ($D > 0,80$) а це підтверджує, що у встановленій оптимальній зоні всі часткові критерії одночасно задовольняються на прийнятному рівні (табл. 4.8, рис. 4.7) [106]. Прогнозована ефективність сепарації на вдосконаленому решеті при раціональних параметрах складає $Y = 79,8 \pm 2,2\%$ (при довірчій імовірності $P = 0,95$).

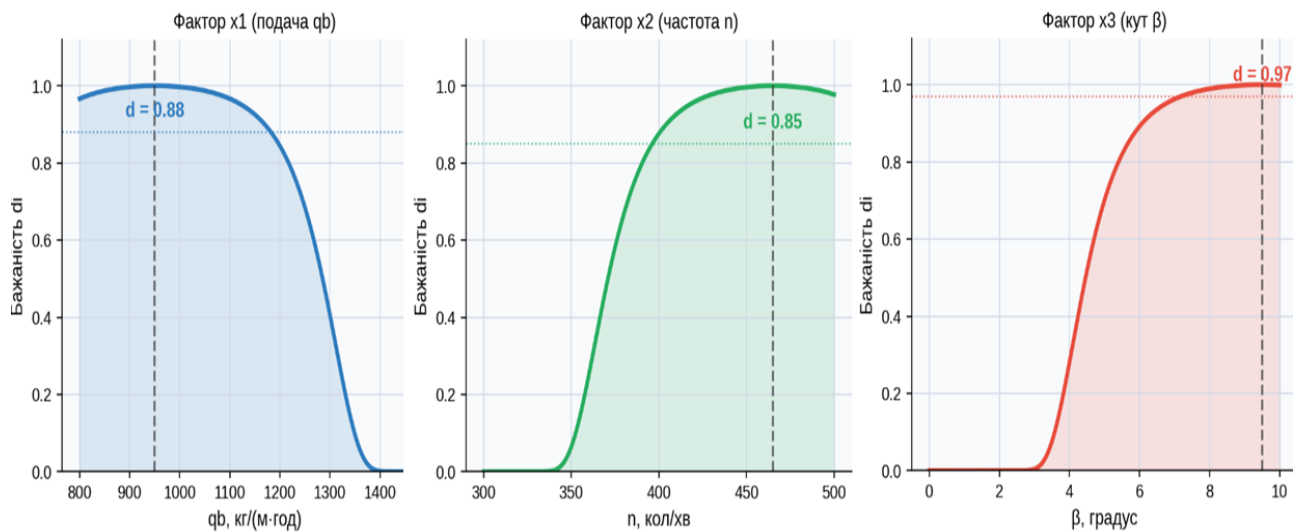


Рис. 4.7. Профілі часткових функцій бажаності для трьох досліджуваних факторів ($D = 0,90$ – оцінка «відмінно»)

Оптимум: $q_b = 950$ кг/(дм·год); $n = 465$ колив/хв; $\beta = 9,5^\circ$

Таким чином, за результатами оптимізації рекомендовані раціональні параметри роботи плоского коливального решета із зигзагоподібним розміщенням продовгуватих отворів наступні: питома подача $q_b = 850...1050$ кг/(дм·год); частота коливань $n = 440...490$ колив/хв; кут відхилення отворів $\beta = 8,5...10,0^\circ$; амплітуда коливань $A = 16$ мм (фіксована); кут нахилу решітного стану $\alpha = 8^\circ$ (фіксований).

4.5. Аналіз профілів передбачених значень і функцій бажаності факторів за результатами обробки у системі STATISTICA 12

Одним із завершальних аналітичних інструментів, що застосовується при обробці результатів центрального композиційного плану другого порядку, є побудова профілів передбачених значень і бажаності (Profiles for Predicted Values and Desirability) у середовищі STATISTICA 12. Цей графічний метод дозволяє наочно відобразити не лише вплив кожного фактора окремо на прогнозоване значення функції відгуку, але й оцінити рівень бажаності (desirability) значення кожного фактора у напрямку досягнення максимуму критерію оптимізації [106, 108]. Аналіз даного графіку є самостійним і

важливим аналітичним кроком, що доповнює результати, отримані при аналізі поверхонь відгуку (підрозділ 4.3) і оптимізації за методом Харрінгтона (підрозділ 4.4), дозволяючи верифікувати висновки про раціональні параметри і характер впливу факторів на критерій оптимізації.

Нижче наведено реальний графік профілів, отриманий безпосередньо в системі STATISTICA 12 за результатами обробки матриці ЦКП 2^3 + зіркові точки для показника ефективності сепарації – повноти розділення Y зернового матеріалу озимої пшениці на плоскому коливальному решеті із зигзагоподібним розміщенням отворів (рис. 4.8).

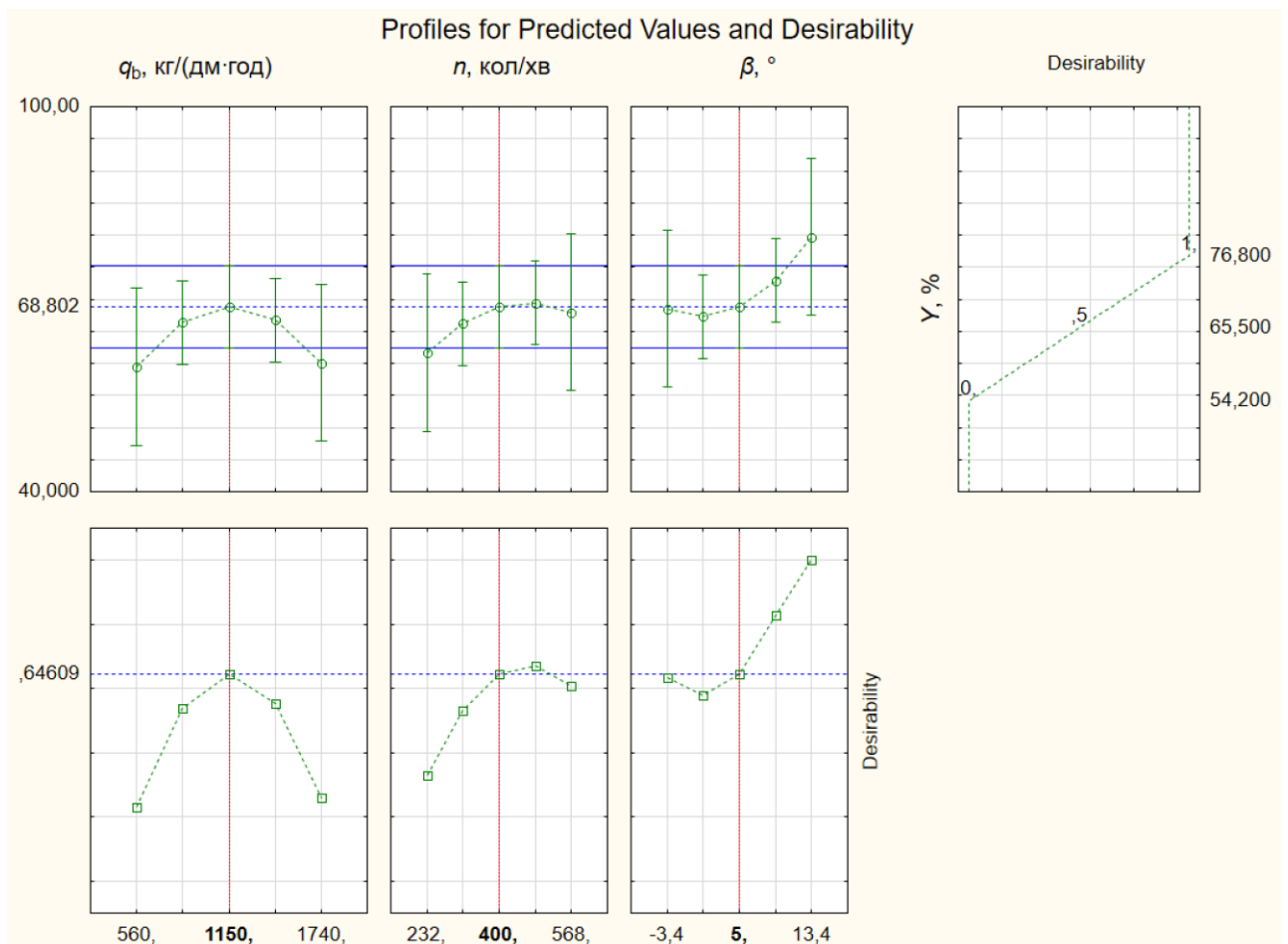


Рис. 4.8. Профілі передбачених значень і бажаності факторів (Profiles for Predicted Values and Desirability) для ефективності сепарації Y , отримані в системі STATISTICA 12 за результатами ЦКП 2^3 + зіркові точки

Загальна структура графіку є наступною: графік (рис. 4.8) побудований у двох рядах. У верхньому ряді подані профілі прогнозованих значень

ефективності сепарації Y (з довірчими інтервалами 95%) окремо для кожного з трьох факторів: питомої подачі q_b (кг/(дм·год)), частоти коливань n (кол/хв) і кута відхилення отворів β (град), а також зведений графік залежності прогнозованого значення Y від бажаності D . У нижньому ряді представлені профілі часткових функцій бажаності d_i для кожного фактора окремо [106].

На кожному з профільних графіків верхнього ряду горизонтальна суцільна синя лінія відповідає максимальному прогнозованому значенню функції відгуку за всіма рівнями відповідного фактора. Нижня суцільна синя лінія відповідає мінімальному прогнозованому значенню. Горизонтальна пунктирна синя лінія фіксує прогнозоване значення при нульовому рівні всіх факторів – $Y_0 = 68,802\%$. Вертикальна червона пунктирна лінія позначає нульовий рівень (центр плану) відповідного фактора. Зелені кола з вертикальними відрізками (whiskers) відображають прогнозовані значення Y та їхні довірчі інтервали 95% при конкретних рівнях кожного фактора [105].

Комплексний аналіз графіку профілів (рис. 4.8), отриманого в системі STATISTICA 12, дозволяє сформулювати низку важливих висновків, що органічно доповнюють результати аналізу поверхонь відгуку та оптимізації параметрів за методом Харрінгтона.

Усі три профілі передбачених значень підтверджують нелінійний (квадратичний) характер залежності ефективності сепарації від кожного із обраних факторів, що загалом підтверджує правомірність застосування поліноміальної моделі другого порядку (рівняння 4.2, 4.4).

Профіль фактора кута відхилення отворів β є єдиним монотонно зростаючим серед трьох. Таке зростання означає, що в рамках усього досліджуваного діапазону значень збільшення кута відхилення отворів завжди призводить до підвищення прогнозованої ефективності. Така поведінка є прямим підтвердженням теоретичної гіпотези про усунення «мертвих зон» та підвищення ймовірності потрапляння часток у площину дії отворів.

Профілі факторів питомої подачі q_b і частоти коливань n мають параболічний характер із максимумом поблизу нульового рівня, що свідчить про наявність оптимуму в досліджуваному факторному просторі і є ознакою коректного вибору меж варіювання для побудови ЦКП.

Зведена функція бажаності $D_0 = 0,64609$ при нульовому рівні факторів доводить те, що при значеннях факторів $q_b = 1150$ кг/(дм·год), $n = 400$ колив/хв, $\beta = 5^\circ$ розроблене решето вже забезпечує задовільну ефективність сепарації, однак не реалізує повний технологічний потенціал зигзагоподібного розміщення отворів на робочій поверхні решета.

Максимальне прогнозоване значення ефективності сепарації $Y = 76,8\%$ досягається при верхньому рівні кута β і є верхньою межею функції відгуку в рамках побудованої регресійної моделі. Це значення практично збігається з фактично вимірним максимумом ефективності у досліджах ($76,8\%$ при $\beta = 10^\circ$, досліді №7, №14 матриці ЦКП (табл. 4.5)).

Різниця між максимальним ($76,8\%$) і мінімальним ($54,2\%$) прогнозованими значеннями критерію оптимізації Y складає $22,6\%$, і ця різниця цілком забезпечується варіюванням кута β від зіркової мінімальної до зіркової максимальної точки. Фактори q_b і n забезпечують значно менший діапазон зміни прогнозу – близько 3...4 відсоткового пункту кожен, що кількісно підтверджує ранжування факторів і результати дисперсійного аналізу (внесок $\beta = 57,3$).

Таким чином, графік профілів передбачених значень і бажаності (рис. 4.8), отриманий в системі STATISTICA 12, є незалежним графічним підтвердженням усіх сформованих висновків, зроблених за результатами статистичної обробки ЦКП-плану: про суттєву роль кута відхилення отворів β , про наявність оптимальних значень факторів q_b і n у досліджуваному діапазоні значень, про значення функції бажаності при нульовому і оптимальному рівнях факторів, а також про прогнозовані межі ефективності решітної сепарації.

Поєднання аналізу профілів бажаності з результатами аналізу поверхонь відгуку (підрозділ 4.3) і методу Харрінгтона (підрозділ 4.4) забезпечує повне і взаємне підтвердження висновків даного дослідження.

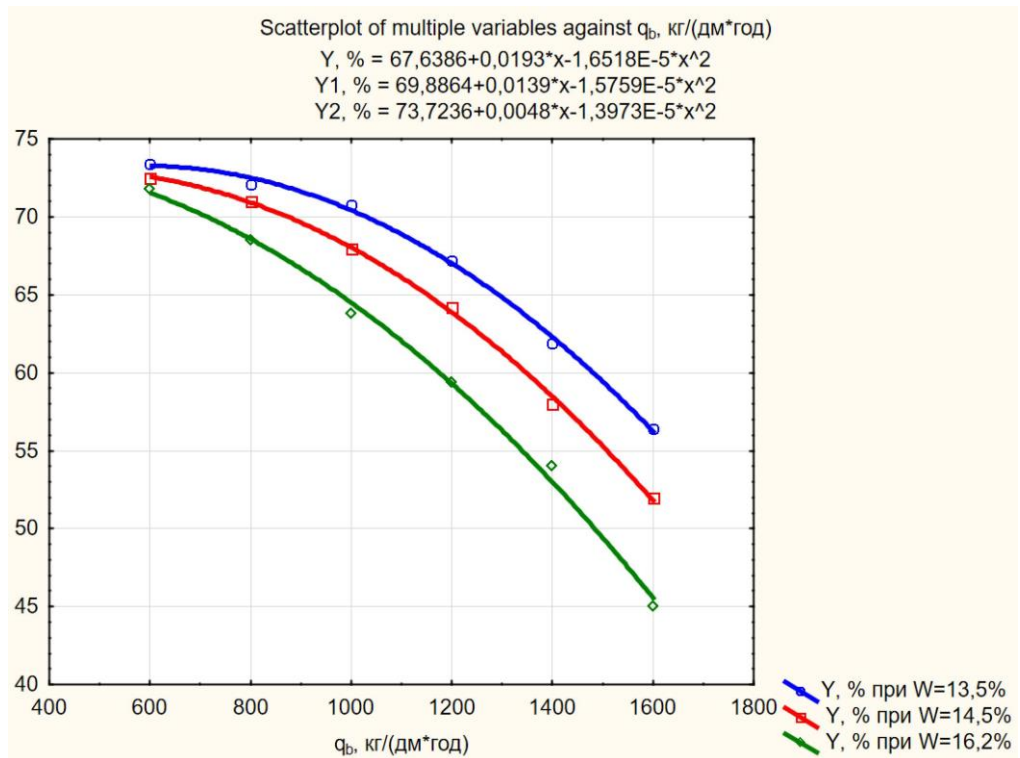
4.6. Вплив вологості та засміченості зернового матеріалу на ефективність роботи вдосконаленого решета

Вологість зернового матеріалу є одним із найбільш варійованих природних чинників, що визначають складність процесу решітної сепарації а її підвищення забезпечує погіршення загальних якісних показників решітного очищення. Підвищена вологість зерноsumіші забезпечує злипання частинок між собою та з поверхнею решета, збільшує коефіцієнти внутрішнього і зовнішнього тертя, погіршуючи внутрішньосхарову рухомість часток. Крім того вологість підвищує інтенсивність забивання отворів [61].

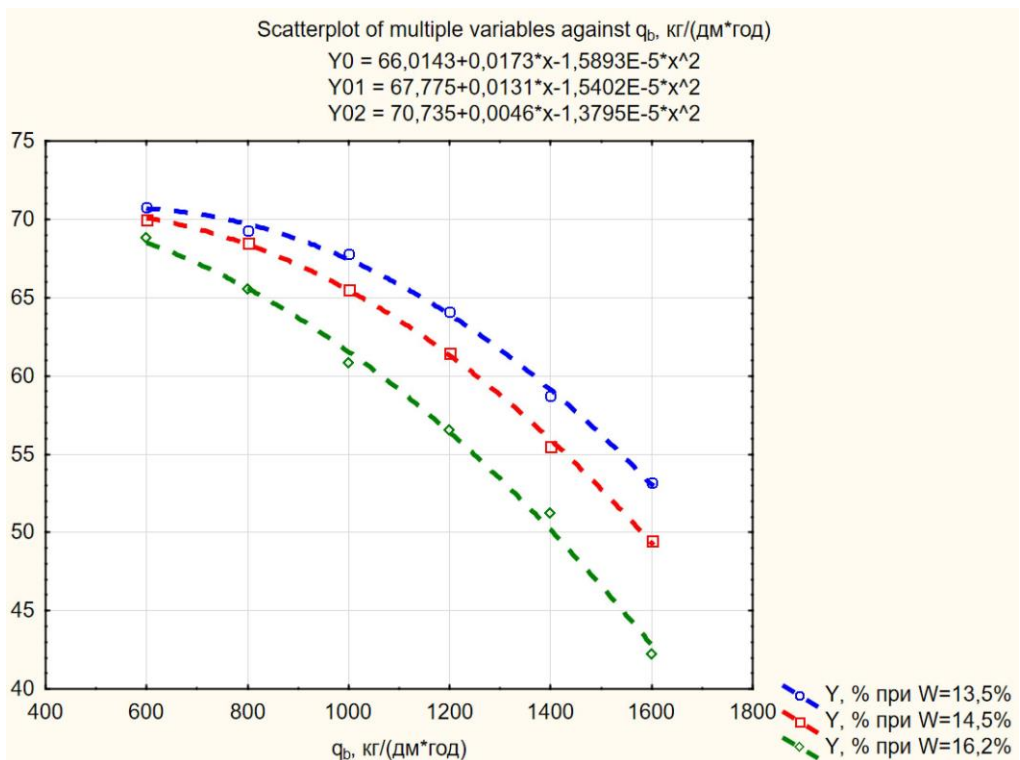
З метою оцінки роботи вдосконаленого решета ($\beta = 10^\circ$) в умовах, що відрізняються від стандартних, проведено серію додаткових порівняльних дослідів при варіюванні вологості матеріалу 13,5...16,2% (рис. 4.9 а) і рівня засміченості дрібними домішками в межах 5...15% (рис. 4.10 а) з порівнянням відносно класичного решета отворів, відповідно (рис. 4.9 б і 4.10 б).

Під час проведення дослідів питому подачу змінювали у всьому робочому діапазоні значень при встановленій частоті коливань $n = 465$ колів/хв і куті решета $\alpha = 7^\circ$.

Аналіз результатів, отриманих в ході проведення експериментів з визначення впливу вологості вихідного матеріалу (рис. 4.9) виявив загальний характер закономірностей: ефективність роботи обох типів досліджуваних решіт суттєво знижується з підвищенням вологості, при цьому перевага оригінального решета з кутом відхилення отворів $\beta = 10^\circ$ є стабільною, але несуттєвою і лежить в межах похибки дослідів – 3...6%.



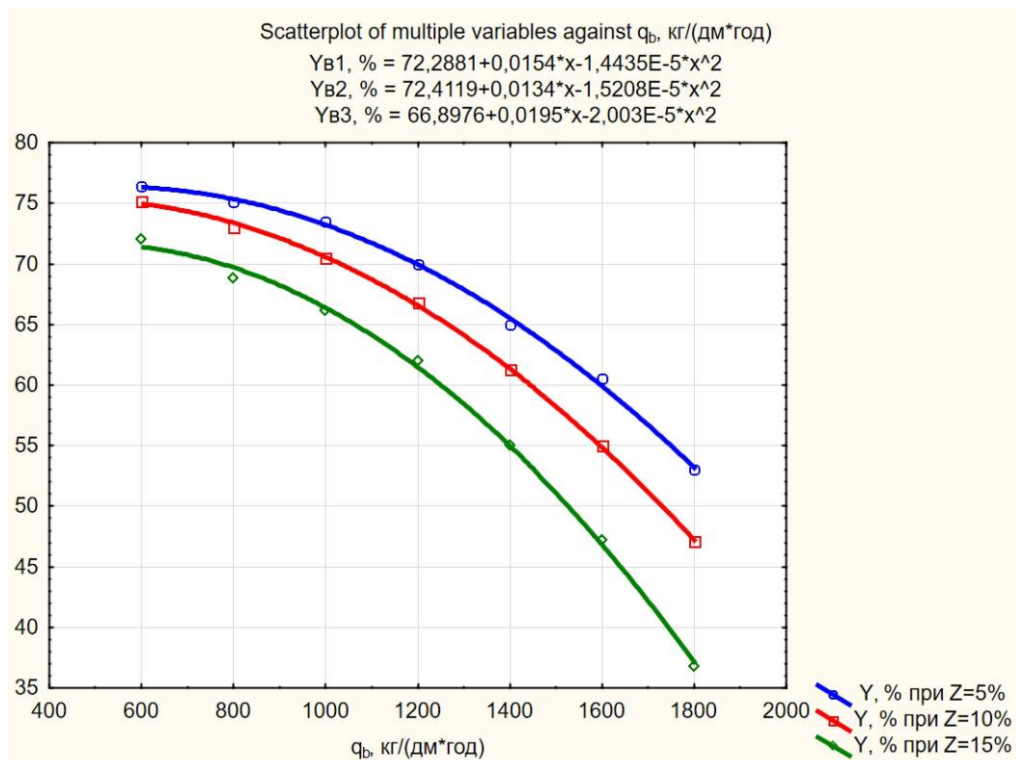
а)



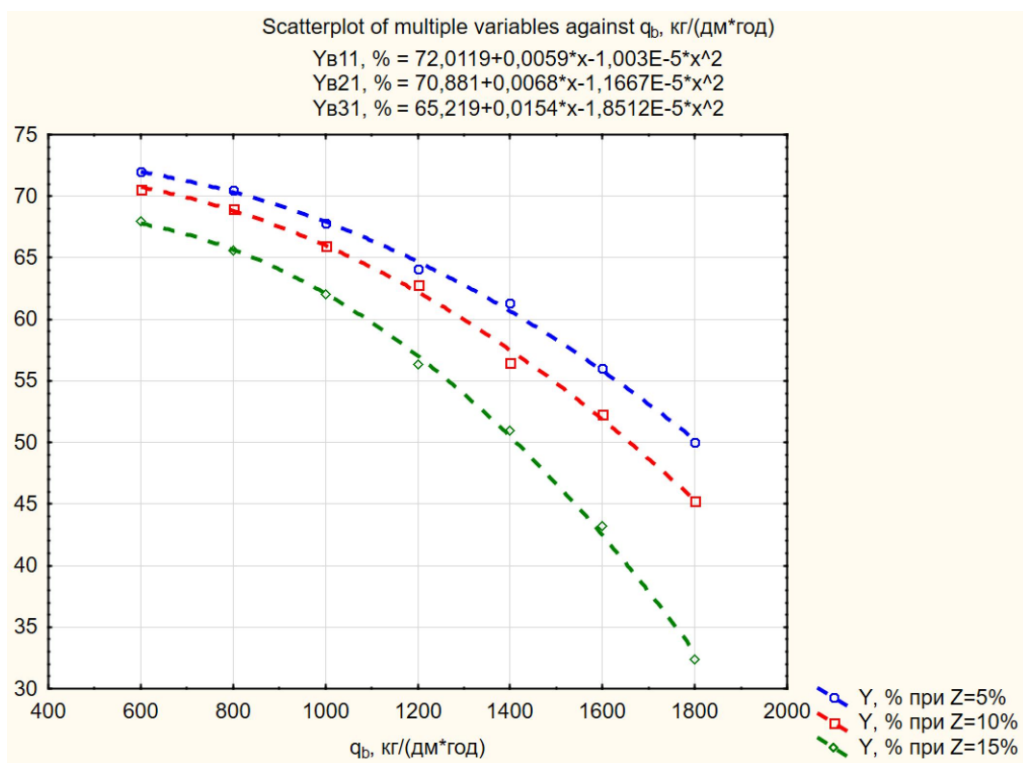
б)

Рис.4.9. Залежності ефективності очищення зернового вороху пшениці різної вологості від питомого навантаження:

а – для оригінального решета ($\beta=10^\circ$); б – для класичного решета ($\beta=0$)



а)



б)

Рис.4.10. Залежності ефективності очищення зернового вороху пшениці різної засміченості від питомого навантаження:

а – для оригінального решета ($\beta=10^\circ$); б – для класичного решета ($\beta=0$)

Нижня межа питомої подачі вологої зернової маси (до 16,2%) при попередньому очищенні складає $q_b \approx 1480$ кг/(дм·год) для оригінального решета, при цьому граничний показник класичного становить $q_b \approx 1400$ кг/дм·год.

Збільшення засміченості вихідного матеріалу дрібними домішками також, як і підвищена вологість погіршує якість очищення, однак при цьому переваги оригінального решета над класичним спостерігаються більш впевнено. Підвищена ефективність очищення на 4-8% в усьому діапазоні питомої продуктивності, у порівнянні з класичним решетом, дозволяє стверджувати про його переваги при роботі на зернових матеріалах високої засміченості.

Нижня межа питомої подачі сильно засміченої дрібними домішками зернової маси (до 15,0%) при попередньому очищенні складає $q_b \approx 1530$ кг/(дм·год) для оригінального решета, при цьому граничний показник класичного становить $q_b \approx 1410$ кг/(дм·год).

У обох випадках ефект пояснюється забезпеченням більшої ймовірності потрапляння прохідних часток в площину отворів, відхилених від вісі решета. Найменша різниця критерію оцінки – повноти розділення (рис. 4.9, 4.10) спостерігається при найнижчій питомій продуктивності $q_b = 600$ кг/(дм·год). Даний ефект є спільним і відображає кращі умови сегрегації часток при малих товщинах матеріалу на решетах [41].

4.7. Порівняльні дослідження ефективності роботи серійного і оригінального решета на зерновому воросі різних культур

Одним із практично важливих етапів впровадження вдосконалених решіт із зигзагоподібним розміщенням отворів у виробництво є оцінка ефективності роботи нової конструкції решета на різних культурах для розробки інженерних рекомендацій щодо проєктування, виробництва і експлуатації зерноочисних машин загального призначення у реальних господарських умовах.

Експерименти цієї серії дослідів проводились у діапазоні питомого зернового навантаження $q_b = 600 \dots 2000$ кг/(дм·год), що відповідає умовам роботи плоских решіт зерноочисних агрегатів від недовантаженого до суттєво перевантаженого режиму їх роботи. Дослідження проведено для вдосконаленого решета із кутом нахилу отворів $\beta = 10^\circ$ і базового решета $\beta = 0^\circ$ при фіксованій частоті коливань $n = 465$ колив/хв, матеріал, що очищався мав природню вологість – борох озимої пшениці 13,7%, жита – 13,9% і ячменю – 14,3%. Засміченість всіх культур дрібними домішками становила близько 5%.

Отримані результати спостережень наведені на рис. 4.11.

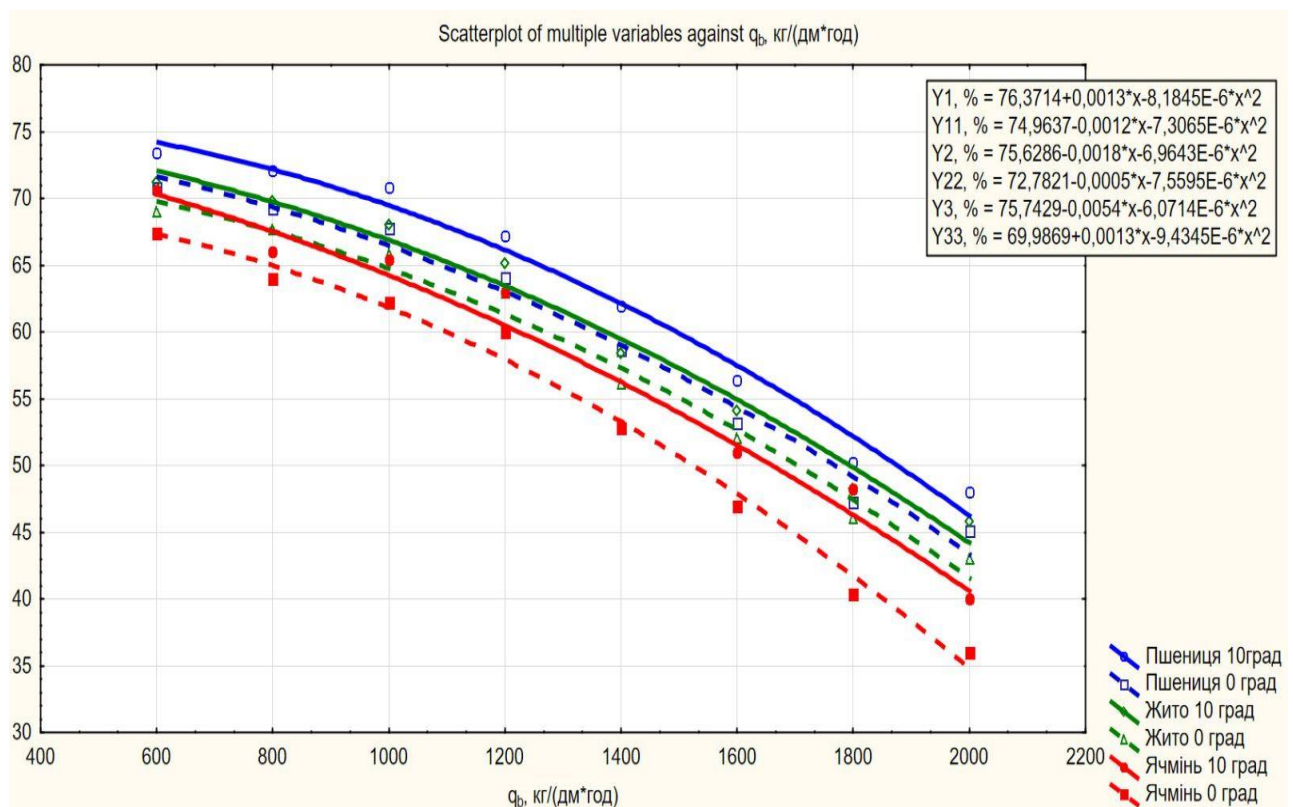


Рис. 4.11. Результати дослідження впливу питомого навантаження на ефективність решітного очищення для основних зернових культур

Аналіз результатів дозволив встановити наступне:

- загальні закономірності зміни повноти виділення домішок для різних зернових культур мають природний характер – якість очищення знижується зі збільшенням навантаження на решето, при цьому відображають характерні для

цих культур відмінності у фізико-механічних і механіко-технологічних властивостях;

- оригінальне решето із зигзагоподібним розміщенням отворів має переваги над серійним у всьому діапазоні зернових навантажень для всіх досліджених культур;

- технологічно доцільна верхня межа питомого навантаження для вдосконаленого решета при попередньому лабораторному очищенні досліджуваних культур становить близько 1640 кг/(дм·год), тоді як для серійного – близько 1510 кг/(дм·год). Для первинного очищення технологічно доцільна межа становить для оригінального – близько 1240 кг/(дм·год), тоді як для серійного – близько 1100 кг/(дм·год).

Таким чином підвищення граничного навантаження означає реальне гарантоване зростання питомої продуктивності решітної частини зерноочисних машин на 8...12% при рівних значеннях повноти розділення.

4.8. Порівняльні дослідження ефективності решітної частини серійного зерноочисного агрегату зі стандартним та вдосконаленим решетом

Для оцінки технологічної ефективності запропонованого технічного рішення у виробничих умовах в якості об'єкту порівняльних досліджень обрано серійний зерноочисний агрегат ЗВС-20А вітчизняного виробництва, розрахований на очищення зернового матеріалу зернових, зернобобових і олійних культур з продуктивністю до 20 т/год. Вибір зазначеного агрегату обумовлений його поширенням в дрібних та середніх фермерських господарствах Кіровоградської та сусідніх областей, а також наявністю взаємозамінних типорозмірів решітних полотен, що дозволяє безпосередньо замінити стандартні решета на дослідні без внесення будь-яких змін до конструкції рами, приводу та корпусних деталей агрегату.

В агрегаті ЗВС-20А решітна частина включає два яруси решіт: нижнє (підсівне) – для виділення дрібних домішок, і верхнє (колосове) – для відокремлення крупних домішок. У порівняльних дослідженнях замінювалось

лише нижні решета (990x740 мм) з розмірами отворів $b_0 \times l = 2,0 \times 25$ мм. Дослідне решето виготовлено із зигзагоподібним розміщенням отворів ($\beta = 10^\circ$) за аналогічними геометричними параметрами робочого полотна.

Умови порівняльних дослідів є наступними: матеріал для очищення – ворох озимої пшениці врожаю 2025 р. Середня вологість становила 14,8%, засміченість дрібними домішками 9,4%; число повторностей експериментів – 5; обробка досліджень – статистична за t -критерієм Стьюдента при $\alpha = 0,05$.

Результати порівняльних досліджень ефективності решітної частини агрегату ЗВС-20А зі стандартним і оригінальним решетом наведено у таблиці 4.9.

Таблиця 4.9

Порівняльні показники ефективності роботи решітної частини агрегату ЗВС-20А зі стандартним і вдосконаленим решетом

Показник	Одиниці вимірювання	ЗВС-20А (серійне решето, $\beta=0^\circ$)	ЗВС-20А (дослідне решето, $\beta=10^\circ$)	Різниця (абсолютна)	Відносна зміна, %
Ефективність сепарації Y	%	$54,7 \pm 2,4$	$68,2 \pm 1,9$	+13,5	+24,7
Питома продуктивність підсівних решіт	кг/(дм·год)	≈ 1250	≈ 1250	-	-
Вміст домішок у зерні після очищення	%	$4,4 \pm 0,4$	$3,1 \pm 0,2$	-1,8	-41,9

Аналіз результатів, представлених в таблиці 4.9 дозволяє підтвердити перевагу вдосконаленого решета ($\beta = 10^\circ$) за всіма оцінюваними показниками. Ефективність сепарації зростає з 54,7% до 68,2%, тобто на 13,5 одиниць в абсолютному вираженні (+24,7% відносно).

Вміст домішок у зерні після очищення зменшується майже в 1,5 рази – з 4,4% до 3,1%, що забезпечує відповідність вимогам ДСТУ 3768:2019 для пшениці 2 класу [3].

Для підтвердження статистичної значущості встановлених відмінностей застосовано t -критерій Стюдента для незалежних вибірок. По основному критерію – ефективності сепарації – розрахункове значення $t_p = 8,21$, що суттєво перевищує табличне $t_T = 2,31$ ($f = 8, \alpha = 0,05$), що повністю підтверджує статистично значущу перевагу вдосконаленого решета [102].

Результати контрольної перевірки зерна після його очищення агрегатом ЗВС-20А дозволяють підтвердити, що при використанні стандартного решета ($\beta = 0^\circ$) зерно пшениці отримувало стабільно 2 клас за вимогами ДСТУ 3768:2019, тоді як при заміні на вдосконалене решето ($\beta = 10^\circ$) якість очищеного зерна відповідає 1 класу. Така різниця у класності прямо визначає різницю у вартості реалізованої продукції, адже за ринковими умовами різниця між 1-м і 2-м класом пшениці становить, за різними джерелами, від 200 до 400 грн/т [3], що робить запропоноване рішення економічно обґрунтованим.

Зведені результати порівняльних досліджень при різних значеннях кута β наведено у таблиці 4.10.

Таблиця 4.10

Результати порівняльних досліджень при різних значеннях кута β

Показник	Одиниці вимірювання	$\beta = 0^\circ$ (контроль)	$\beta = 10^\circ$	Джерело / стандарт
Ефективність сепарації	%	54,7	68,2	Власні дослідження
Смітна домішка у очищеному зерні	%	1,4	0,9	ДСТУ 3768:2019
Зернова домішка у очищеному зерні	%	3,0	2,2	
Відповідність класу пшениці	клас	2	1	

Аналіз таблиці 4.10 доводить поліпшення показників якості решітного очищення зерна зі збільшенням кута β від 0° до 10° . При $\beta = 10^\circ$ вміст смітної домішки у основному зерні 0,9% відповідає вимогам ДСТУ 3768:2019 для 1-го класу пшениці, тоді як при $\beta = 0^\circ$ показник 1,4% відповідає 2-му класу.

4.9. Перевірка збіжності результатів теоретичних і експериментальних досліджень

Завершальним етапом даних досліджень є порівняння теоретичних і експериментальних результатів, що дозволяє підтвердити або спростувати гіпотезу про адекватність розробленої теоретичної моделі і правомірність прийнятих припущень і спрощень [101, 109].

Порівняння ймовірнісних оцінок ефективності. Теоретичне значення ймовірності потрапляння прохідних часток у площину отворів, розраховане за аналітичними залежностями Розділу 2 (формула 2.7), є геометричною ймовірнісною оцінкою і не враховує ряд технологічних чинників, що визначають фактичну ефективність сепарації. Саме це і обумовлює систематичне відхилення між теоретичними і експериментальними значеннями. Так, при $\beta = 0^\circ$ теоретична ймовірність становить 51,2%, тоді як фактична ефективність сепарації – 54,7% (табл. 4.10). Розбіжність 3,5 в.п. пояснюється тим, що реальний коливальний рух решета і час перебування матеріалу на поверхні підвищують ймовірність просіювання навіть за відсутності кута нахилу отворів.

При $\beta = \beta_{кр} \geq 4,6^\circ$ теорія прогнозує досягнення 100% ймовірності геометричного потрапляння, але фактично повного просіювання не відбувається через наявність прохідних часток матеріалу у всіх горизонтах шару, обмеженість часу перебування на решеті і, власне, фізико-механічних властивостей матеріалу. При цьому, реальне встановлення оригінального решета з кутом відхилення отворів від поздовжньої вісі дає суттєвий приріст повноти розділення (табл. 4.10) до показника 68,2%, що більше ніж у класичного на 13,5 в.п. або майже на чверть – у відносному вираженні.

Кількісна оцінка збіжності. Для об'єктивної кількісної оцінки виконано розрахунок відносного відхилення між теоретично прогнозованими і фактично вимірними значеннями ефективності для семи контрольних значень β (0° , 2° , 4° , 6° , 8° , 10° , 11°). Середнє відносне відхилення склало $\delta = 7,8 \pm 3,2\%$. Для

інженерних наук розбіжність між теоретичними і експериментальними даними у межах 10...15% прийнята як задовільна [101, 109]. Встановлена розбіжність $\delta = 7,8\%$ знаходиться в межах допустимого.

Якісна збіжність. Поряд із кількісною, встановлено повний збіг якісного характеру залежностей: напрям і знак впливу всіх трьох факторів відповідає теоретичним передумовам; критичний кут $\beta_{кр}$, передбачений теорією, збігається із зоною найбільш інтенсивного зростання ефективності в однофакторному досліді; від'ємні знаки квадратичних коефіцієнтів регресії (b_{11} , b_{22} , b_{33}) підтверджують нелінійний характер залежностей, передбачений аналітичною моделлю.

Отже, сукупність кількісних і якісних оцінок дозволяє констатувати задовільну збіжність теоретичних і експериментальних результатів. Це підтверджує достатню адекватність теоретичної моделі руху частинки на решеті із зигзагоподібно розміщеними отворами і свідчить про правомірність прийнятих при теоретичному аналізі спрощень.

Висновки до розділу IV

1. За результатами попередніх однофакторних пошукових досліджень виконано ранжування шести потенційних факторів за ступенем їх впливу на ефективність сепарації зерна пшениці. Встановлено, що трьома найбільш вагомими чинниками є питома подача матеріалу q_b , частота коливань решітного стану n і кут відхилення осей отворів від поздовжньої осі решета β . Визначено раціональні діапазони їх варіювання для реалізації центрального композиційного плану: $q_b = 800...1500$ кг/(дм·год), $n = 300...500$ коливань/хв, $\beta = 0...10^\circ$.

2. Реалізовано центральний композиційний план другого порядку ЦКП 2^3 +зіркові точки (20 дослідів у трикратній повторності). Відтворюваність дослідів підтверджена критерієм Кохрена ($G_p = 0,241 < G_T = 0,391$ при $\alpha = 0,05$).

Отримана вибірка результатів задовольняє умові нормальності розподілу залишків за критерієм Шапіро–Уїлка ($W = 0,958 > W_{0,05} = 0,905$).

3. Методом найменших квадратів у STATISTICA 12 отримано адекватну регресійну модель другого порядку: $R^2 = 0,950$; $F_{\text{розн}} = 42,6 > F_{\text{табл}} = 3,02$ ($\alpha = 0,05$). Дев'ять з десяти коефіцієнтів регресії є статистично значущими за t -критерієм ($p < 0,05$). Рівняння регресії отримано у кодованому та натуральному вигляді, що дозволяє безпосередньо використовувати його для прогнозування ефективності сепарації і проектування конструкцій.

4. Аналіз поверхонь відгуку виявив позитивну взаємодію між кутом β і частотою коливань n ($b_{23} = +1,25$) та від'ємну взаємодію між кутом β і питомою подачею q_b ($b_{13} = -1,46$). Ці закономірності мають практичне значення для налаштування зерноочисних машин: при підвищеному навантаженні рекомендується дещо зменшувати кут β , а за сприятливих умов (помірна подача і висока частота коливань) – збільшувати до $\beta = 9 \dots 10^\circ$.

5. За методом функції бажаності Харрінгтона ($D = 0,90$) встановлено раціональні параметри: $q_b = 850 \dots 1050$ кг/(дм·год); $n = 440 \dots 490$ колив/хв; $\beta = 8,5^\circ \dots 10,0^\circ$. Прогнозована ефективність сепарації $79,8 \pm 2,2\%$.

6. Дослідження впливу вологості і засміченості матеріалу на ефективність роботи решіт підтвердили, що при їх збільшенні ефективність сепарації суттєво знижується. Вдосконалене решето з кутом відхилення отворів $\beta = 10^\circ$ зберігає стабільну перевагу над базовим ($\beta = 0^\circ$) у всьому діапазоні вологості $W = 13,5 \text{--} 16,2\%$, однак перевага несуттєвою і лежить в межах похибки дослідів – $3 \dots 6\%$. Збільшення ж засміченості дрібними домішками в межах $5 \text{--} 15\%$ демонструє переваги оригінального решета над класичним більш впевнено – оригінальне решето має кращі показники ефективності на $4 \text{--} 8\%$ в усьому діапазоні питомої продуктивності $q_b = 600 \dots 1800$ кг/(дм·год).

7. Порівняльні дослідження ефективності роботи серійного і оригінального решета на зерновому воросі пшениці, жита і ячменю дозволили встановити технологічно доцільні верхні межі питомого навантаження, які

складають: для вдосконаленого решета при попередньому лабораторному очищенні – 1640 кг/(дм·год) і серійного – близько 1510 кг/(дм·год), при первинному, відповідно – 1240 кг/(дм·год) і 1100 кг/(дм·год). Таким чином гарантоване зростання питомої продуктивності при застосуванні оригінального решета складає 8-12% при рівних значеннях повноти розділення.

8. Порівняльні дослідження на агрегаті ЗВС-20А підтвердили перевагу вдосконаленого решета за всіма показниками: ефективність сепарації зростає на 24,7%; загальний вміст домішок у зерні знижується з 4,4% до 3,1%, що при спостереженому вмісті смітної домішки 0,9% дозволяє отримати відповідність 1 класу за ДСТУ 3768:2019 для пшениці. Різниця між варіантами статистично значуща ($t_p = 8,21 > t_T = 2,31$ при $\alpha = 0,05$).

9. Порівняння теоретичних і експериментальних результатів підтвердило задовільну збіжність: середнє відносне відхилення $\delta = 7,8 \pm 3,2\%$, що знаходиться в межах допустимого для інженерних досліджень (10...15%). Якісна відповідність є повною, включаючи підтвердження критичного кута $\beta_{кр}$ і нелінійного характеру отриманих залежностей.

РОЗДІЛ V

ПРОГНОЗОВАНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ

5.1. Обґрунтування підходу до оцінки ефективності технічного рішення

Прогнозування економічної та технологічної ефективності запропонованого технічного рішення є наступним етапом наукового дослідження. Отримані в попередніх розділах результати теоретичних та експериментальних досліджень плоского коливального решета із зигзагоподібним розміщенням продовгуватих отворів (кут відхилення отворів $\beta = 10^\circ$) забезпечили необхідну кількісну базу для переходу від лабораторних показників до прогнозованого ефекту на виробництві.

Оцінка прогнозованої ефективності [112, 116, 119] проводилася у трьох взаємопов'язаних площинах:

- технологічній (підвищення якості очищення зерна та продуктивності роботи зерноочисного обладнання);
- економічній (зростання вартості кінцевої продукції);
- конкурентній (переваги для виробників і споживачів сільськогосподарської техніки).

Такий комплексний підхід відповідає методології оцінки ефективності впровадження науково-технічних розробок у виробництво та дозволяє обґрунтувати доцільність виробничого застосування запропонованого технічного рішення [112, 113].

При визначенні прогнозованих показників ефективності використано для розрахунків базовий агрегат – серійну зерноочисну машину ЗВС-20А зі встановленими стандартними підсівними решетами та оригінальними, що мають продовгуваті зигзаговидно розташовані отвори, з кутом відхилення від поздовжньої вісі ($\beta = \pm 10^\circ$). Саме дана машина в якості бази для виробничих випробувань оригінального решета була використана, оскільки вона є

поширеним типом обладнання, що часто експлуатується в дрібних і середніх фермерських господарствах Центральної України.

Вибір даного зерноочисного агрегату у якості об'єкта порівняння дозволяє забезпечити високу репрезентативність висновків для широкого кола потенційних споживачів.

5.2. Прогнозований технологічний ефект від впровадження вдосконаленого решета у виробництво

Результати порівняльних досліджень, проведених у ФГ «Звездун О.М.», с. Мар'ївка, Кропивницького району, Кіровоградської області на зерноочисному агрегаті ЗВС-20А (розділ 4, підрозділ 4.8), є основою для кількісного прогнозування технологічних переваг вдосконаленого решета у виробничих умовах. Зведені технологічні показники представлені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Прогнозовані технологічні показники впровадження вдосконаленого решета

Показник	Одиниці вимірювання	Серійне решето ($\beta = 0^\circ$)	Вдосконалене решето ($\beta = 10^\circ$)	Зміна, %
Ефективність сепарації Y	%	54,7	68,2	+24,7
Питома продуктивність підсівних решіт	кг/(дм·год)	≈1250	≈1250	-
Вміст домішок у очищеному зерні	%	4,4	3,1	-30
Смітна домішка у очищеному зерні	%	1,4	0,9	-35
Зернова домішка у очищеному зерні	%	3,0	2,2	-40
Клас пшениці за ДСТУ 3768:2019	–	2	1	–

Серед наведених показників (табл. 5.1) особливої уваги заслуговує зниження вмісту домішок у зерні після очищення з 4,4% до 3,1%, тобто майже у 1,5 рази, що сумісно з досягненням оригінальним варіантом зменшення смітної домішки до величини 0,9%, дозволяє підвищити клас зерна з 2-го до першого.

Ця величина є найбільш значущою з позицій стандартизації якості зернової продукції: відповідно до вимог ДСТУ 3768:2019 і дозволяє збільшити ціну зерна на 200–400 грн/т.

Зростання якісного показника роботи зерноочисної машини – повноти розділення дозволяє при незмінних габаритних розмірах агрегату і без внесення будь-яких змін у його конструкцію, в тому числі механізму приводу та корпусних деталей, отримати більш якісний продукт. Це є одним із найважливіших практичних результатів, що підтверджує доцільність запропонованого технічного рішення як простої і малозатратної модернізації зерноочисного обладнання, що працює із плоскими коливальними решетами.

Крім того, підвищена майже на чверть якість сепарації створює перспективи підвищення продуктивності агрегату при забезпеченні рівного з базовим показника повноти розділення.

5.3. Прогнозований економічний ефект для споживачів сільськогосподарської техніки

Прогнозований економічний ефект для фермерських господарств і агропідприємств, що безпосередньо використовують зерноочисну техніку на етапі післязбиральної обробки врожаю, формується на основі кількох взаємопов'язаних чинників: підвищення класності зерна і, відповідно, його ринкової вартості; зниження прямих втрат зерна у відходах; скорочення витрат на електроенергію; зменшення витрат на технічне обслуговування. Розрахунок прогнозованого економічного ефекту виконано для типового невеликого фермерського господарства, що вирощує пшеницю на площі 100 га та використовує агрегат ЗВС-20А для післязбиральної обробки врожаю. Результати розрахунку представлені у вигляді таблиці 5.2. Саме такий масштаб господарювання є найбільш характерним для Кіровоградської та сусідніх областей Центральної України.

Підвищення класності зерна від 2 до 1 класу є одним із джерел отримання прибутку. За даними зернового ринку України, різниця у ціні між пшеницею 2-

го і 1-го класу становить від 200 до 400 грн/т залежно від кон'юнктури. Для більш вірного розрахунку прийнято мінімальну цінову надбавку 250 грн/т.

За умови середньої врожайності 5 т/га і площі 100 га загальний обсяг зібраного зерна потенційно складає 500 т за сезон.

Таблиця 5.2

Розрахунок прогнозованого річного економічного ефекту для типового фермерського господарства (посівна площа 100 га пшениці)

Стаття ефекту	Формула / основа розрахунку	Значення, грн/рік
Надбавка за підвищення класності зерна	$500 \text{ т} \times 250 \text{ грн/т}$	125000
Економія на доочищенні	орієнтовно	8000
Економія електроенергії (~10%)		5000
Разом прогнозований річний ефект	—	138000

Наведений розрахунок проведено за традиційною методикою, оскільки базується на мінімальних значеннях цінових надбавок [114, 115]. При сприятливих ринкових умовах або вищій урожайності прогнозований економічний ефект може значно зрости. Слід також врахувати, що вдосконалене решето є прямою заміною стандартного решітного полотна без будь-яких конструктивних змін в конструкцію самого зерноочисного агрегату, що мінімізує витрати на впровадження і не вимагає залучення більш кваліфікованого технічного персоналу.

Додатковим, опосередкованим джерелом економічного ефекту може бути підвищення пропускної здатності зерноочисного агрегату на 8...12% (п. 4.7) при однаковій якості сепарації, що потенційно скорочує строки післязбиральної обробки зібраного врожаю. Своєчасне і якісне очищення зерна безпосередньо після збирання знижує ризики самозігрівання і псування, що в умовах нестабільної погоди під час жнив перетворюється на дійсний економічний ефект, який важко формалізувати, але є відомим агровиробникам.

Окремо слід розглянути ефективності впровадження в господарствах різного масштабу. Для малих фермерів (до 100–150 га) відносний ефект від підвищення класності зерна є особливо відчутним, оскільки вони частіше реалізують зерно безпосередньо переробним підприємствам або елеваторам, де різниця між класами різко впливає на закупівельну ціну. Для середніх господарств (300–1000 га) описаний ефект масштабується пропорційно обсягу виробництва і може бути ще вищим в абсолютному вираженні.

5.4. Прогнозований ефект для виробників сільськогосподарської техніки

Технічне рішення, що запропоноване в рамках даного наукового дослідження, є конструктивно простим і не потребує зміни технологічних процесів роботи машин у яких встановлюються класичні пробивні решета. Перехід від серійного розміщення отворів до зигзагоподібного (кут відхилення отворів $\beta = 10^\circ$) може бути реалізований шляхом модифікації штампувального оснащення (матриці та пуансони) без зміни матеріалу полотна, параметрів обробки або складальних операцій.

Для вітчизняних виробників зерноочисної техніки запропоноване рішення відкриває конкурентні переваги:

- вдосконалене решето може позиціонуватися як преміальний технологічний компонент у складі нових агрегатів або як опція для оновлення парку уже реалізованих машин;
- підтвердження переходу зерна з 2 класу до 1 класу за ДСТУ є вагомим маркетинговим аргументом, що може бути задокументований і наведений у технічних характеристиках обладнання;
- підвищення продуктивності на 8-12% при аналогічній з базовою конструкцією допустимій якості очищення відповідає актуальному запиту ринку на ефективне обладнання.

З позицій патентної охорони, конструкція решета із зигзагоподібним розміщенням отворів є новим технічним рішенням, що підлягає патентуванню в Україні та потенційно – в країнах-імпортерах вітчизняної зерноочисної техніки,

зокрема в державах Центральної та Східної Азії, де зернові культури займають значні посівні площі. Наявність патентного захисту дозволить виробнику формувати технологічну ренту і захиститися від копіювання рішення конкурентами.

На етапі оцінки ефективності можна виділити і соціальний аспект, адже в умовах воєнного часу і необхідності відновлення агропромислового комплексу України, впровадження рішень, що підвищують якість та кількість придатного до реалізації зерна при мінімальних капіталовкладеннях, є одним із пріоритетів розвитку галузі в цілому. Вдосконалене решето є саме таким рішенням, оскільки не потребує повної заміни агрегату, а вартість виготовлення нового решітного полотна є незначною порівняно з прогнозованим річним економічним ефектом.

5.5. Аналіз строку окупності та показників ефективності інвестицій

Для оцінки інвестиційної привабливості впровадження вдосконаленого решета розраховано основні показники ефективності: строк простої окупності, чиста поточна вартість і внутрішня норма рентабельності (таблиця 5.3) [116]. Вихідними даними для розрахунку є: прогнозований річний економічний ефект 125000 грн; орієнтовна вартість виготовлення і встановлення комплексу вдосконалених решіт для агрегату ЗВС-20А – 15000...20000 грн (оцінка на основі аналізу ринку); термін служби решітного полотна – 3...5 сезонів за умови нормальної експлуатації.

Результати проведених розрахунків (табл. 5.3) підтверджують, що витрати на придбання і встановлення вдосконаленого решітного полотна для малого господарства (100 га) окупаються протягом 3...4 місяців збиральної кампанії. Коефіцієнт ефективності капіталовкладень на рівні 3,5...4,5 за весь строк служби решета є цілком прийнятним для вкладень у технологічне переоснащення і підтверджує економічну доцільність впровадження запропонованого технічного рішення.

Показники ефективності впровадження вдосконаленого решета

Показник	Значення	Примітка
Прогнозований річний економічний ефект	138000 грн	Консервативна оцінка (100 га)
Одноразові витрати на впровадження	15000...20000 грн	Виготовлення + встановлення решіт
Строк простої окупності	3...4 місяці збиральної кампанії	При обробці ~500 т зерна/рік
Коефіцієнт ефективності капіталовкладень	3,5...4,5	Річний ефект / Витрати
Рентабельність впровадження	350...450 %	Протягом строку служби решета
Термін служби решітного полотна	3...5 сезонів	За умов нормальної експлуатації

Слід додатково зазначити, що наведений розрахунок не враховує опосередкованих позитивних ефектів, зокрема: підвищення конкурентоспроможності господарства на зерновому ринку завдяки стабільній якості продукції; зниження ризиків штрафних санкцій або переоцінки зерна на елеваторах через невідповідність класності; покращення умов зберігання зерна завдяки зниженому вмісту вологих органічних домішок. Врахування цих чинників лише посилить позитивний висновок про доцільність впровадження даного рішення у виробництво.

5.6. Прогнозування ефекту за умови масового впровадження вдосконаленого решета у зерноочисній галузі

Масштабування прогнозованого ефекту на рівень регіону дозволяє оцінити сукупний потенціал запропонованого технічного рішення на найближчу перспективу. Слід, однак, підходити до такого прогнозування обережно, адже у короткостроковій перспективі темпи впровадження нових технічних рішень у

малих господарствах обмежується фінансовими можливостями товаровиробників, інерційністю ринку та необхідністю проведення демонстраційних випробувань. Тому для першого етапу поширення реалістичним є охоплення не більше 1–2% від загального парку зерноочисних агрегатів класу 10–25 т/год у Кіровоградській та сусідніх областях, що може складати орієнтовно до 20 одиниць зерноочисної техніки. За умови, що кожне з цих господарств обробляє в середньому 500...700 т зерна на рік і отримує щорічний ефект близько 120...160 тис. грн, сукупний прогнозований річний ефект на рівні регіону складе від 2,4 до 3,2 млн грн. Ця величина є цілком реалістичною і не потребує завищених припущень щодо темпів впровадження нових технологій.

Перехід значної частки зерна з 2 до 1 класу в загальнодержавному масштабі підвищує конкурентоспроможність українського зерна на зовнішніх ринках. Україна є одним з найбільших світових експортерів пшениці, і будь-яке системне підвищення якісних показників вітчизняного зерна позитивно впливає на умови торговельних контрактів і прибутки аграрної галузі.

5.7. Порівняльний аналіз із відомими технічними рішеннями-аналогами

Для підтвердження наукової новизни і практичної цінності запропонованого технічного рішення варто розглянути його переваги у порівнянні з існуючими підходами до вдосконалення решітних сепараторів, відомих зі світової практики та наукової літератури (табл. 5.4).

Одним із відомих напрямів підвищення ефективності решітного очищення є застосування решіт з гумово-полімерних матеріалів чи пруткових решіт, так зване «самоочисне решето», що має знижену схильність до забивання завдяки еластичності матеріалу. Основним недоліком такого підходу є висока вартість матеріалу і значне скорочення живого перерізу решета порівняно зі сталевими пробивними аналогами, що призводить до зниження питомої продуктивності.

Іншим відомим підходом є застосування вібраційних або ультразвукових збудників, що вмонтовуються у решітну рамку і знижують схильність часток до

застрягання. Такі системи демонструють суттєве зниження рівня забивання отворів, проте вимагають додаткового електрообладнання, системи керування, підвищують складність конструкції і витрати на обслуговування. Вдосконалене решето із зигзагоподібними отворами досягає схожого результату щодо зниження забивання суто конструктивними заходами, без будь-якого додаткового обладнання.

Третім напрямом є застосування комбінованих повітряно-решітних систем підвищеної інтенсивності з декількома послідовними ступенями очищення. Такі системи здатні забезпечити якість очищення на рівні 1–2 класу, але вимагають значних капіталовкладень (зазвичай від 500000 до 2000000 грн за новий агрегат) і займають значно більші виробничі площі. Впровадження вдосконаленого решета у склад наявного агрегату ЗВС-20А дозволяє досягти аналогічної класності при витратах на два порядки менших.

Таблиця 5.4

Порівняльна характеристика вдосконаленого рішення з альтернативними підходами до післязбирального очищення

Параметр порівняння	Зигзагоподібне решето ($\beta=10^\circ$)	Струнне чи гумово-полімерне решето	Ультразвуковий збудник решета	Новий агрегат із 2 ступенями очищення
Підвищення ефективності сепарації	+24,7%	+8...12%	+10...15%	+35...50%
Витрати на впровадження	35...45 тис. грн	80...150 тис. грн	150...300 тис. грн	500...2000 тис. грн
Зміна конструкції агрегату	Не потребує	Не потребує	Потребує монтажу	Новий агрегат
Збільшення споживання ел/е	Немає (-15,9%)	Немає	+5...15%	+30...60%
Строк окупності	< 1 місяць	3...6 місяців	6...12 місяців	3...7 років

Наведене порівняння (табл. 5.4) доводить, що запропоноване рішення займає унікальну нішу, адже воно забезпечує суттєве підвищення якості очищення при мінімальних витратах на впровадження і без необхідності зміни конструкції базового решітного зерноочисного агрегату. Такий баланс між ефектом і витратами робить рішення привабливим для широкого кола споживачів, включаючи дрібних і середніх фермерів з обмеженим інвестиційним ресурсом.

5.8. Оцінка ризиків та обмежень застосування

Об'єктивна оцінка прогнозованої ефективності потребує також аналізу потенційних ризиків і обмежень, що можуть вплинути на фактичний ефект від впровадження розробки у виробництво [117, 118].

Першим фактором ризику є необхідність точного дотримання раціональних параметрів і режимів роботи. Встановлені в розділі 4 раціональні значення – питома подача 850...1050 кг/(дм·год), частота коливань 440...490 колив/хв, кут $\beta = 10,0^\circ$ – є доцільними для післязбиральної обробки зерна озимої пшениці та схожих за фізико-механічними і механіко-технологічними властивостями матеріалів. Для інших культур (кукурудзи, соняшнику, ріпаку сої та ін.) параметри потребують коригування, що обумовлює необхідність проведення додаткових досліджень з метою розширення рекомендацій на більш широкий спектр сільськогосподарських культур.

Другий фактор – виробничі допуски при виготовленні решітного полотна. Зигзагоподібне розміщення отворів є більш складним для штампування порівняно з паралельним розміщенням, що може призвести до зростання собівартості виготовлення. Проте, як показують розрахунки, навіть дворазове збільшення вартості решета не змінює висновку про привабливість інвестицій.

Третім фактором є консерватизм потенційних споживачів, характерний для аграрного сектору загалом. Сільськогосподарські виробники віддають перевагу перевіреному, звичному зерноочисному обладнанню. Подолання цього бар'єру потребує проведення демонстраційних випробувань у господарствах, що є стандартною практикою просування нових агрегатів і вузлів на ринок.

Таким чином, сукупність технологічних, економічних і конкурентних переваг дозволяє стверджувати, що запропоноване технічне рішення – плоске коливальне решето із зигзагоподібним розміщенням продовгуватих отворів – є науково обґрунтованим, виробничо доцільним і комерційно привабливим. Отримання позитивного економічного ефекту при впровадженні є практично гарантованим, що підтверджується як розрахунками на основі реальних експериментальних даних, так і кон'юктурою зернового ринку України.

Спеціально розроблена програма для розрахунку ефективності впровадження та результати розрахунків представлені в Додатку Д.

5.9. Оцінка технічної новизни результатів досліджень

В результаті проведення патентного пошуку нами виявлені технічні рішення оригінальних решітних робочих органів і сепараторів [120-131], а також способи підвищення ефективності розділення зерна за розмірами [79, 80, 132-135], запатентовані винахідниками в різний час і які призначені для вирішення аналогічних задач.

Найбільш близьким за технічними ознаками до дослідного решета є винахід [126], авторства вченого С.І. Малюти з Таврійського державного агротехнологічного університету. Винахідником запропоновано ідею однонаправленого відхилення продовгуватих отворів від поздовжньої вісі решета, однак при такому розташуванні отворів зернова маса буде системно зміщуватися по площі решета у бік нахилу отворів, діагонально розвантажуючи одну частину решета і перевантажуючи іншу, що призведе до зниження ефективності сепарації.

Найближчим за технологічним ефектом до дослідного решета є винахід [75] вчених Харківського національного технічного університету імені Петра Василенка під керівництвом професора М.В. Бакума. Ідея винахідників полягала у виведенні часток, що знаходяться над перетинками з положення стійкої рівноваги, шляхом надання решету додаткових поперечних коливань. Попри очевидну ефективність, недоліком даної конструкції є технічна складність механізму приводу і необхідність контролю можливого резонансу системи.

Таким чином дослідне оригінальне решето із зигзагоподібним розташуванням продовгуватих отворів забезпечує досягнення ефекту виведення часток, що знаходяться у положенні стійкої рівноваги між отворами над перетинками, при цьому не створює діагонального перерозподілу навантаження на робочу поверхню, здійснює класичний коливальний рух, при цьому має всі ознаки технічної новизни, що відображено у отриманому патенті України на корисну модель № 154304.

Висновки до розділу V

1. Прогнозована технологічна ефективність вдосконаленого решета підтверджена кількісними показниками: зростання ефективності сепарації на 24,7%, зниження загального вмісту домішок у зерні з 4,4% до 3,1%.

2. Прогнозований позитивний економічний ефект від впровадження вдосконаленого решета для типового малого фермерського господарства площею 100 га пшениці складає близько 138000 грн на рік, при цьому строк окупності капіталовкладень на рівні 15000...20000 грн становить 3...4 місяці виробничої кампанії, що є прийнятним строком для інвестицій у технологічне переоснащення.

3. Перехід зерна пшениці від 2 до 1 класу за ДСТУ 3768:2019 є головним джерелом прогнозованого економічного ефекту і підтверджує доцільність впровадження технічного рішення з позиції підвищення конкурентоспроможності зернопродукції на внутрішньому і зовнішньому ринках.

4. Для виробників зерноочисної техніки впровадження вдосконаленого решета є конструктивно простим кроком, що не потребує значних капіталовкладень, водночас відкриваючи можливості для патентного захисту, позиціонування більш якісного продукту та виходу на нові ринки.

5. Регіональне масштабування ефекту при охопленні 1–2% парку зерноочисних агрегатів класу 10...25 т/год у Кіровоградській та сусідніх областях (близько 20 одиниць) дозволяє прогнозувати сукупний річний ефект на рівні 2,4...3,2 млн грн є реалістичним та обґрунтованим орієнтиром для першого етапу промислового впровадження даного технічного рішення.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі здійснено теоретичне обґрунтування та експериментальне підтвердження нового технічного рішення у галузі машин і засобів механізації сільськогосподарського виробництва – плоского коливального решета із зигзагоподібним розміщенням продовгуватих отворів для сепарації зернового матеріалу. Отримані результати дозволяють сформулювати такі загальні висновки:

1. Аналіз стану проблеми очищення зернового вороху свідчить про те, що вміст домішок у свіжозібраному зерні досягає 10...15%, що унеможлиблює його зберігання і реалізацію без попередньої післязбиральної обробки. Встановлено, що решітна сепарація залишається основним методом попереднього та первинного очищення зернових культур завдяки найвищій кореляції між розмірними параметрами насіння та показниками якості, конструктивній простоті, відпрацьованості технологій і прийнятним питомим енерговитратам. Виявлено принциповий конструктивний недолік серійних плоских пробивних решіт, а саме – паралельне розміщення поздовжніх осей отворів відносно напрямку руху зернового матеріалу призводить до формування «мертвих зон» над поздовжніми перетинками, що суттєво знижує ймовірність просіювання прохідних часток і загальну ефективність сепарації.

2. На основі геометричного аналізу процесу решітної сепарації встановлено, що загальна ймовірність потрапляння прохідної частки у площину отвору класичного пробивного решета ($\beta = 0^\circ$) визначається співвідношенням ширини отвору до поперечного кроку решета і у реальних конструкціях не перевищує 50–60%, що є принциповим обмеженням ефективності серійних решіт. Виявлено, що поздовжній рух часток вздовж осі решета при паралельному розміщенні отворів не сприяє їх поперечній орієнтації відносно щілин, а частки, центр ваги яких збігається з проекцією поздовжньої перетинки, знаходяться у стані стійкої рівноваги і можуть переміщуватися над «мертвою зоною» по всій довжині решета без просіювання.

3. Обґрунтовано та запропоновано нове конструктивне рішення – плоске решето із зигзагоподібним (почерговим знакозмінним) розміщенням продовгуватих прямокутних отворів відносно поздовжньої осі. Аналітично доведено, що поворот осей отворів на кут β збільшує повну поперечну проекцію отвору до величини $b_0 \cdot \cos\beta + l \cdot \sin\beta$. Встановлено критичний кут відхилення $\beta_{кр} \geq 4,6^\circ$ (для $l = 25$ мм, $b_0 = 2$ мм), при якому поперечні проекції сусідніх отворів перекриваються, «мертві зони» над перетинками повністю зникають, а ймовірність потрапляння прохідної частки у площину отвору зростає від 50% ($\beta = 0^\circ$) до гарантованих 100% незалежно від поперечного положення частки на решеті.

4. Побудовано аналітичну модель руху зернової частки по поверхні коливального решета із зигзагоподібно розміщеними отворами, яка враховує кінематику плоскопаралельного руху решітного стану, силу тяжіння, опору шару та силу тертя ковзання. Отримано аналітичні вирази для швидкості частки залежно від переміщення для різних значень кутів β , частоти коливань, кута нахилу решітного стану і сил опору шару і тертя. Встановлений діапазон раціональних значень кута нахилу коливань $\theta = 60 \dots 70^\circ$ при куті тертя часток $\varphi = 21^\circ$ і кутах відхилення отворів $\beta = 0 \dots 10^\circ$ дозволяє забезпечити ефективну передачу коливань часткам при постійному контакті з решетом, що досягається умовою безвідривного руху при показнику кінематичного режиму $K < 1$.

5. Теоретично встановлено, що зигзагоподібне розміщення отворів практично не змінює «живий» переріз решета порівняно з класичним при збереженні однакових розмірів і кількості отворів, тоді як теоретична ймовірність потрапляння прохідних часток в площину отворів зростає і досягає гарантованого рівня. Таким чином, запропоноване конструктивне рішення забезпечує підвищення ефективності сепарації виключно за рахунок геометричного перерозподілу положення отворів без збільшення металоємності, маси або габаритів решітної поверхні.

6. Для перевірки теоретичних гіпотез розроблено програму та методику експериментальних досліджень на базі лабораторного сепаратора Petkus Wutha

К 294А з використанням центрального композиційного плану другого порядку (ЦКП 2^3). Виготовлено дослідні зразки решітних полотен з кутами відхилення отворів $\beta = 0^\circ; 3^\circ; 5^\circ; 7^\circ; 9^\circ; 11^\circ$. За результатами однофакторних пошукових досліджень встановлено три основних фактори впливу на ефективність сепарації: питома подача зернового матеріалу ($q = 600\text{--}1700$ кг/(м·год)), частота коливань ($n = 200\text{--}600$ колив/хв) і кут відхилення осей отворів від осі решета ($\beta = 0\text{--}11^\circ$). Реалізовано повний план ЦКП із 20 дослідями і трикратним повторенням кожної точки плану; відтворюваність, значущість та адекватність результатів підтверджено за критеріями Кохрена, Стьюдента і Фішера.

7. За результатами статистичної обробки даних ЦКП отримано регресійні математичні моделі другого порядку, що адекватно описують залежність ефективності решітної сепарації від досліджуваних факторів. Аналіз поверхонь відгуку та оптимізація за методом функції бажаності Харрінгтона дозволили встановити раціональні параметри роботи вдосконаленого решета: питома подача $q = 850\text{...}1050$ кг/(м·год), частота коливань $n = 440\text{...}490$ колив/хв, кут відхилення $\beta = 10^\circ$. Збіжність теоретично спрогнозованих і експериментально встановлених оптимальних значень β не перевищує 8%, що підтверджує адекватність розробленої аналітичної моделі.

8. Порівняльні дослідження вдосконаленого ($\beta = 10^\circ$) і серійного ($\beta = 0^\circ$) решіт при однакових умовах роботи зерноочисного агрегату ЗВС-20А на зерні озимої пшениці показали, що впровадження запропонованого конструктивного рішення забезпечує підвищення ефективності сепарації на 24,7% (з 54,7% до 68,2%), зниження вмісту домішок у зерні після очищення більш ніж удвічі – з 4,4 до 3,1%. Можливе зростання питомої продуктивності решітної частини решета складає 8-12% при рівних значеннях повноти розділення.

9. Встановлено, що вдосконалене решето забезпечує високу якість очищення зерна пшениці, що при спостереженому вмісті смітної домішки 0,9% дозволяє отримати відповідність 1 класу за ДСТУ 3768:2019, тоді як серійне решето за типових виробничих режимів забезпечує 2 клас. Збереження переваги вдосконаленого решета над серійним у досліджуваному діапазоні

вологості зернового матеріалу (13,5–16,2%) і вмісті дрібних домішок 5–15% підтверджує стабільність ефекту і придатність технічного рішення для реальних виробничих умов роботи зерноочисного обладнання.

10. Прогнозований позитивний економічний ефект від впровадження вдосконаленого решета для типового малого фермерського господарства площею 100 га пшениці складає близько 138000 грн на рік, при цьому строк окупності капіталовкладень на рівні 15000...20000 грн становить 3...4 місяці; головним джерелом ефекту є перехід зерна з 2 до 1 класу за ДСТУ 3768:2019, що забезпечує цінову надбавку. Реалізація рішення для виробника техніки не потребує зміни конструкції агрегату – лише модифікації штампувального оснащення, що підтверджує промислову доцільність його виготовлення і є підставою для виготовлення і встановлення запропонованого решета на весь спектр зерноочисних агрегатів, що працюють із плоскими коливальними решетами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Машини, агрегати та комплекси для післязбиральної обробки і зберігання врожаю / за ред. Халіна С. В., Лебедева С. А.; Міністерство аграрної політики та продовольства України; УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого. Дослідницьке, 2023. 323 с.
2. Сільськогосподарські машини: підручник / Д. Г. Войтюк, Л. В. Аніскевич, В. В. Іщенко та ін.; за ред. Д. Г. Войтюка. Київ : Агроосвіта, 2015. 679 с.
3. ДСТУ 3768:2019. Пшениця. Технічні умови. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. 16 с.
4. Машини, агрегати та комплекси для післязбиральної обробки і зберігання зернових культур: посібник / за ред. В.І. Кравчука. Дослідницьке : УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого, 2011. 224 с.
5. Концепція комплексного вирішення проблеми післязбиральної обробки і зберігання зерна в сільськогосподарських підприємствах України / Адамчук В. В. та ін. *Механізація та електрифікація сільського господарства*. Глеваху : ННЦ «ІМЕСГ». 2014. Вип. 99. С. 40–56.
6. Сільськогосподарські машини: теоретичні основи, конструкція, проектування. Книга 3. Машини та обладнання для переробки зерна та насіння / Сисолін П.В., Петренко М.М., Свірень М.О.; за ред. Черновола М.І. К. : Фенікс, 2007. 432 с.
7. Підвищення ефективності роботи решіт / Бакум М. В. та ін. *Молодь і технічний прогрес в АПК*: матеріали XX міжнародної науково-практичної конференції, 26-27 листопада 2025 року. Харків : ДБТУ, 2025. С. 155–157.
8. Наукові основи ощадливої підготовки насіння з поліпшеним біологічним потенціалом : монографія / Бредихін В. В. та ін. Харків : Діса+, 2023. 408 с.
9. Підвищення ефективності попереднього очищення зернових сумішей / С.М. Лещенко, О.М. Васильковський, М.І. Васильковський, В.В.

Гончаров . *Сільськогосподарські машини*: зб. наук. ст. Вип. 18. Луцьк: ред. вид. відділ ЛНТУ, 2009. – С. 230–234.

10. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку: підручник / Войтюк Д.Г., Барановський В.М., Булгаков В.М. та ін.; за ред. Д.Г. Войтюка. Київ : Вища освіта, 2005. 464 с.

11. Jagusiak-Kocik M. et al. Optimizing the separation process of difficult-to-separate wheat and barley grain mixtures using vibrofriction technology. *System Safety: Human-Technical Facility-Environment*. 2024. Т. 6.

12. Богомолів О.В. Аналіз конструкцій сепараторів для сепарації важкороздільних зернових сумішей. *Інженерія переробних і харчових виробництв*. 2017. № 1. С. 47–51.

13. Обґрунтування конструктивної схеми пневморешітного сепаратора зерна / Васильковський О.М. та ін. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин* : Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Кропивницький : ЦНТУ, 2021. Вип. 51. С. 104–110.

14. Обґрунтування алгоритму функціонування інерційно-прямоточних зерноочисних машин / С.М. Лещенко та ін. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*: Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Вип. 24 (1). Кіровоград, КНТУ, 2011. С. 176–181.

15. Modeling of Aerodynamic Separation of Preliminarily Stratified Grain Mixture in Vertical Pneumatic Separation Duct / Kharchenko S., Borshch Y., Kovalyshyn S., Piven M., Abduev M., Miernik A., Popardowski E., Kielbasa P. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11(10). 4383. <https://doi.org/10.3390/app11104383>.

16. Котов Б.І., Степаненко С.П., Швидя В.О. Технологічні аспекти сепарації зерна у вертикальному каналі. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. Вип. 46. 2016. С. 154–159.

17. Степаненко С.П. Механіко-технологічне обґрунтування процесів і обладнання безрешітного фракціонування зернових матеріалів: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.05.11. Глеваха, 2020. 48 с.

18. Методика симуляції процесу сепарації насіннєвого матеріалу дрібнонасіннєвих культур на циліндричному чарунковому трієрі / Е. Б. Алієв, К. О. Лупко. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 1 (108). С. 36–44.
19. Алієв Е.Б. Механіко-технологічні основи процесу прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11. Запоріжжя, 2020. 530 с.
20. Bredykhin V. et al. Determination of ways of improving the process of separation of seed materials on the working surface of the pneumatic sorting table. *Agricultural Engineering*. 2024. Т. 28. №. 1. С. 51–71.
21. 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.
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 сільського господарства: Загальнодержавний збірник*. 2021. Вип. №14 (113). Глеваху : ННЦ «ІМЕСГ», 2021. С. 77–87. DOI:10.37204/0131-2189-2021-14-8.
23. Степаненко С. П. Підвищення ефективності вібропневматичних сепараторів зерна : дис. ... канд. техн. наук. Глеваху : ННЦ «ІМЕСГ», 2008. 183 с.
24. Бредихін В. В. Наукові основи процесів вібропневматичного розділення насіннєвих матеріалів за густиною насіння : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.11. Центральноукраїнський. нац. техн. ун-т. Кропивницький, 2023. 451 с.
25. Pneumonitis Fractionation of Grain Materials in Air Streams of Variable Structure / S.P. Stepanenko, B.I. Kotov . *ТЕКА. An International Quarterly Journal on Motorization, Vehicle Operation, Energy Efficiency and Mechanical Engineering*. Lublin-Rzeszow. 2018. Vol. 18. No 2. P. 69–74.

26. Researches concerning impurities separation process from mass of cereal seeds using vibrating sieves in air flow currents / Bracacescu C., Gageanu I., Popescu S., Selvi K.C. *Engineering for Rural Development*. Jelgava, 2016. P. 364–370.

27. Теорія сепарування зерна: монографія / Ольшанський, В. П. та ін. Харків : ПланетаПрінт, 2017. 803 с.

28. Бредихін В. В., Півень М. В., Ковальов Б. С. Результати виробничих випробувань зернового сепаратора А1-БЦСМ-100 з модернізованими решетами. *Молодь і технічний прогрес в АПК: матеріали XX міжнародної науковопрактичної конференції, 26-27 листопада 2025 року*. Харків: ДБТУ, 2025. С. 194–195.

29. Підвищення ефективності роботи зерноочисних машин загального призначення / М.І. Васильковський, О.М. Васильковський, М.М. Косінов та ін. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодержавний міжвідомчий наук.-техн. збірник*. Кіровоград : КДТУ. 2001. Вип. 30. С. 71–74.

30. Розробка нової конструкції пневморешітної зерноочисної машини. Том 1. Обґрунтування параметрів транспортера-сепаратора / В.М. Сало та ін. Кіровоград : СПД ФО Лисенко В.Ф., 2014. 108 с.

31. Васильковський О.М., Васильковський М.І., Осипов І.М. Обґрунтування принципової схеми високопродуктивного сепаратора зерна. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодержавний міжвідомчий наук.-техн. збірник*. Кіровоград : КДТУ, 2002. Вип. 32. С. 135–140.

32. Вдосконалення технологічного процесу очищення зерна зерноочисними машинами загального призначення / М.І. Васильковський, О.М. Васильковський, С.М. Мороз та ін. *Вісник ЛДАУ. Агроінженерні дослідження*. 1999. №3. С. 102–107.

33. Сало В.М., Лузан П.Г., Богатирьов Д.В. Технічне забезпечення підготовки зерна до зберігання : монографія. Кіровоград : СПД ФО Лисенко В.Ф., 2013. 148 с.

34. Лузан П.Г., Васильковський О.М. Нові конструкції решіткових сепараторів. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник*. Вип. 27. 1999. С. 123–127.

35. Підвищення якості роботи решітних сепараторів за рахунок модернізації їх решіт / Бакум М. В та ін. *Молодь і індустрія 4.0 в XXI столітті: матеріали XX Міжнар. форуму молоді, 4-5 квіт. 2024 р.* Харків : ДБТУ, 2024. С. 15.

36. Удосконалення конструкції решіт насіннеочисних машин / Бакум М. В. та ін. *Молодь і технічний прогрес в АПК: матеріали XX міжнародної науково-практичної конференції, 26-27 листопада 2025 року.* Харків : ДБТУ, 2025. С. 150–152.

37. Щодо впровадження удосконаленої конструкції решіт / Бакум М. В. та ін. *Молодь і технічний прогрес в АПК: матеріали XX міжнародної науково-практичної конференції, 26-27 листопада 2025 року.* Харків : ДБТУ, 2025. С. 147-149.

38. До створення концепції «ідеального» решета зернового сепаратора / Васильковський О. М., Лещенко С. М., Мороз С. М., Нестеренко О. В. *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>.

39. Попередні дослідження пасивного струнного решета / Васильковський О.М. та ін. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник*. – Кропивницький: ЦНТУ. Вип. 52. 2022. С. 73–80.

40. Інтенсифікація процесу сепарації зерна на плоскому коливальному решеті із зигзаговидним розташуванням отворів / Бажан І.М., Васильковський О.М., Лещенко С.М., Амосов В.В. *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>.

41. Тіщенко Л. М. Наукові основи процесів вібровідцентрового сепарування зернових сумішей : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.11. Харків, 2004. 403 с.

42. 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).

43. 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).

44. 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.

45. Еліт Тех : офіційний сайт компанії [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://elitteh.com.ua>. – Назва з екрана. – (Дата звернення : 12.02.2026).

46. Завод Мороза : офіційний сайт компанії [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://zavodmoroza.com>. – Назва з екрана. – (Дата звернення : 12.02.2026).

47. Самопересувні зерноочисні машини [Електронний ресурс] / BIM Agritech. – Режим доступу : <https://bim-agritech.com/uk/samoperesuvni-zernoochysni-mashyny>. – Назва з екрана. – (Дата звернення : 12.02.2026).

48. Сепаратор попереднього очищення СПО-16 [Електронний ресурс] / Аеромех. – Режим доступу : <https://ua.aeromeh.com.ua/product/separator-predvaritelnoj-ochistki-spo-16/>. – Назва з екрана. – (Дата звернення : 12.02.2026).

49. Сепаратори зерноочисні [Електронний ресурс] / Smart МехЗавод. – Режим доступу : <https://smart.mehzavod.com.ua/catalog/separatory-zernoochistitel/>. – Назва з екрана. – (Дата звернення : 12.02.2026).

50. Обладнання для очищення зерна [Електронний ресурс] / Оліс. – Режим доступу : <https://olis.com.ua/oborudovanie/ochischennya-zerna/>. – Назва з екрана. – (Дата звернення : 12.02.2026).
51. Grain handling [Електронний ресурс] / Bühler Group. – Режим доступу : <https://www.buhlergroup.com/global/en/industries/Grain-handling.html>. – Назва з екрана. – (Дата звернення : 12.02.2026).
52. Seed cleaning [Електронний ресурс] / PETKUS. – Режим доступу : <https://www.petkus.com/products/sorting/cleaners/seed-cleaning>. – Назва з екрана. – (Дата звернення : 12.02.2026).
53. About Satake USA [Електронний ресурс] / Satake USA. – Режим доступу : <https://satake-usa.com/about-satake-usa/>. – Назва з екрана. – (Дата звернення : 12.02.2026).
54. Vibration seed/grain cleaner [Електронний ресурс] / MMC Tech. – Режим доступу : <https://mmctech.us/products/vibration-seed-grain-cleaner/>. – Назва з екрана. – (Дата звернення : 12.02.2026).
55. Schneider-Jaquet : офіційний сайт компанії [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.schneider-jaquet.fr/en/>. – Назва з екрана. – (Дата звернення : 12.02.2026).
56. Вплив процесу сепарації на зниження вологості зернового матеріалу / Бакум М. В., Завгородній О. І., Сіняєва О. В., Крекот М. М. *Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини*: тези доповідей Всеукр. науково-практ. конф., 8 червня 2023р.; Харків : ДБТУ, 2023. С. 5–6.
57. Методика визначення коефіцієнтів тертя сипучих зернових сумішей / М.І. Васильковський, О.М. Васильковський, І.М. Осипов, М.М. Косинов. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*: Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Вип. 27, 1999. С. 143–145.

58. Ольшанський В. П. Про рух неоднорідної дрібнозернистої суміші по плоскому віброрешету. *Інженерія переробних і харчових виробництв*. 2017. № 2 (1). С. 17–22.
59. Васильковський О. М. Розробка конструкції та обґрунтування параметрів відцентрового решітного сепаратора зерна: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11. Кіровоград, 2001. 18 с.
60. The influence of basic parameters of separating conveyor operation on grain cleaning quality / Vasytkovskyi O., Vasytkovska K., Moroz S., Sviren M., Storozhyk L. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2019. 57(1). P.63–70.
61. Завгородній О.І. Наукові основи процесів очищення отворів решіт зерноочисних машин: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.11. Харків, 2001. 37 с.
62. Задорожній О., Мороз С.М., Васильковський О.М. Аналіз конструкцій очисних пристроїв гравітаційних решіт з коливальним рухом решітного стану зерноочисних машин загального призначення. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Кропивницький : ЦНТУ. Вип. 53. 2023. С. 237–246.*
63. Identification of a mixture of grain particle velocity through the holes of the vibrating sieves grain separators / Tishchenko L., Kharchenko S., Kharchenko F., Bredykhin V., Tsurkan O. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 2. № 7 (80). 63-69. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.65920
64. Заїка П.М. Теорія сільськогосподарських машин. Очистка і сортування зерна. Харків: Око, 2006. 408 с.
65. Обґрунтування геометричних параметрів пруткового циліндричного барабана відцентрово-пневматичного сепаратора / Д.І. Петренко та ін. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Кіровоград, 2012. Вип. 42 (1). С. 140–145.*

66. Васильковський О. М., Петренко Д. І. Аналіз закономірності руху частки по прутковому барабану відцентрово-пневматичного сепаратора зерна. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник*. Вип. 37. Кіровоград : КНТУ, 2007. С. 109–115.
67. Математична модель роботи відцентрово-пневматичного сепаратора зерна / О. М. Васильковський, В. В. Гончаров, Д. І. Петренко, С. М. Лещенко. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. Вип. 10. Т.8. Мелітополь : ТДАТУ, 2010. С. 94–104.
68. Котов Б.І., Степаненко С.П., Калініченко Р.А. Теоретичне обґрунтування руху частинки зерна на вібропневморешеті при дії розпушувачих робочих органів. *Науковий вісник НАУ*. 2007. Вип. 115. С. 112–117.
69. A Study on the Dynamic Behavior of a Sieve in an Industrial Sifter / Modrzewski, R.; Obraniak, Rylski, A.; Siczek, K. *Appl. Sci.* 2022, 12, 8590. <https://doi.org/10.3390/app12178590>.
70. Li J., Webb C., Pandiella S.S., Campbell G.M. A numerical simulation of separation of crop seeds by screening – effect of particle bed depth. *Food and Bioproducts Processing*. 2002. Vol. 80, No. 2. P. 109–117. <https://doi.org/10.1205/09603080252938744>.
71. Степаненко С.П. Аналіз взаємодії пасивного розпушувача із віброзрідженим зерновим шаром. *Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України*. Дослідницьке. 2005. Вип. 8(22); Кн. 2. С. 290–297.
72. Півень М. В., Бредихін В. В., Котенко В. П. Пошкодження зерна вібровідцентровими решетами з розпушувачами шару суміші. *Молодь і технічний прогрес в АПК: матеріали XX міжнародної науково-практичної конференції, 26-27 листопада 2025 року*. Харків : ДБТУ, 2025. С. 196–197.
73. Чумак Д. О., Бредихін В. В. Дослідження травмованості насіння при використанні інтенсифікаторів шиповидного типу. *Молодь і технічний прогрес*

в АПВ: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 26-27 листопада 2024 р.; Держ. біотехнологічний ун-т. Харків, 2024. С. 567–569.

74. Guerreiro F. S., Gedraite R. and C. H. Ataíde. Residual moisture content and separation efficiency optimization in pilot-scale vibrating screen. *Powder Technol.* 2016. 287. 301–307. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.10.016>.

75. Спосіб інтенсифікації сепарації насінневих матеріалів на решетах з прямокутними отворами : пат. 84498 Україна: МПК В07В1/00. № у 2013 04561. / М. В. Бакум, С. О. Харченко, М. О. Винокуров, О. С. Вотченко та ін.; власник М. В. Бакум та ін.; заявл. 11.04.2013; опубл. 25.10.2023, Бюл.№ 20/2013.

76. Frączek J., Recałaf T. Modelowanie ruchu warstwy ziarnistej na sicie wibracyjnym o trajektorii eliptycznej. *Inżynieria Rolnicza.* 2006. Т. 10, № 11. S. 147–154.

77. Bieniek, J., Komarnicki, P. & Detyna, J. Correction to: Innovative aerodynamic grain separation system for plant harvesting in sloped areas: problems, research and optimization of parameters. *Archiv. Civ. Mech. Eng.* 21, 56 (2021). <https://doi.org/10.1007/s43452-021-00213-7>.

78. Liang, Z., Wada, M.E. Development of cleaning systems for combine harvesters: A review. *Biosyst. Eng.* 2023, 236(1), 79–102. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.10.0184>.

79. Спосіб інтенсифікації сепарації насінневих сумішей на плоских решетах: пат. 50874 Україна: МПК В07В1/00. № у 2009 13683. / С. О. Харченко, М. В. Бакум. Власник: Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка; заявл. 28.12.2009; опубл. 25.06.2010, Бюл.№ 12/2010.

80. Спосіб інтенсифікації сепарації насінневих сумішей на штампованих решетах: пат. 58042 Україна: МПК В07В1/28. № у 2010 11203. / С. О. Харченко, М. В. Бакум. Власник: Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка; заявл. 20.09.2010; опубл. 25.03.2011, Бюл. № 6/2011.

81. Моделювання динаміки зернової суміші при сепарації на рифленому решеті вібросепаратора / Тіщенко Л.М., Ольшанський В.П., Харченко Ф.М., Харченко С.О. *Інженерія природокористування*. 2014. № 2(2). С. 54–60.

82. Аналіз багат шарового руху зерна на нерухомій похилій робочій поверхні / С.М. Мороз, М.І. Васильковський, О.М. Васильковський, В.В. Гончаров. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин* : Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Кіровоград, 2011. Вип. 41 (2). С. 203–207.

83. Мороз С. М., Васильковський М.І., Васильковський О.М. До визначення довжини пруткового решета. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*: Загальнодержавний міжвідомчий наук.–техн. збірник. Кіровоград : КДТУ, 2003. Вип. 33. С. 121–124.

84. Аналіз руху матеріальної частки по поверхні циліндричної перетинки пруткового решета / Васильковський М.І., Васильковський О.М., Мороз С.М., та ін. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація* : Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. Вип. 17. Кіровоград : КНТУ, 2006. С. 89–94.

85. Сидоренко В. В., Васильковський О. М., Петренко Д. І. Обґрунтування ширини робочого каналу пруткового барабану відцентрово-пневматичного сепаратора зерна. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин*. Загальнодержавний міжвідомчий науково-технічний збірник. Вип. 38. Кіровоград : КНТУ, 2008. С. 149–153.

86. Мороз С. М., Васильковський М. І., Васильковський О. М. Обґрунтування діаметрів стержнів пруткового решета. *Техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація*. Кіровоград : КНТУ. 2004. Вип. 14. С. 72–78.

87. Cleary P.W. Large scale industrial DEM modeling. *Eng Comput*. 2004. Vol. 21. P. 169–204. <https://doi.org/10.1108/02644400410519730>.

88. 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>.
89. 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>.
90. Лузан П. Г. Обґрунтування параметрів та режимів роботи інерційно-гравітаційного решітчастого сепаратора зерна: дис... канд. техн. наук: 05.05.11; Кіровоградський держ. технічний ун-т. Кіровоград, 2001. 185с.
91. Li, Z., Tong, X. A study of particles penetration in sieving process on a linear vibration screen. *Int J Coal Sci Technol* 2, 299–305 (2015). <https://doi.org/10.1007/s40789-015-0089-7>.
92. Influence of Sieve Surface Attitude on Sieving Performance of Granular Materials with Non-Uniform Feeding Conditions / Zhu, L., Chen, S., Zhao, Z., Ding, H., & Zhu, Y. *Agriculture*, 12(12), 2023. <https://doi.org/10.3390/agriculture12122023>.
93. Feng, X. et al. Behavior of maize particle penetrating a sieve hole based on the particle centroid in an air-screen cleaning unit. *Powder. Technol.* 385, 501-516 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.02.035>.
94. Optimization of indented cylinder rice separator parameters using RSM for enhanced sorting efficiency and reduced loss / Sokudlor N., Laloon K., Junsiri C., Sudajan S. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal.* 2024. Vol. 26, No. 2. P. 196–206. <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/9047/4253>.
95. Тіщенко Л.М. Інтенсифікація сепарування зерна. Харків : Основа, 2004. 224 с.
96. Lawinska K., Modrzewski R. Analysis of sieve holes blocking in a vibrating screen and a rotary and drum screen. *Physicochemical Problems of Mineral Processing.* 2017. Vol. 53, No. 2. P. 812–828. <https://doi.org/10.5277/ppmp170212>.

97. Stepanenko, S., & Kotov, B. Theoretical research of separation process grain mixtures. *Machinery & Energetics*. 2019. 10(4), 137–143. DOI: 10.31548/machenergy.2019.04.147-153.
98. Васильковський О. М., Васильковський М. І., Осипов І.М. Обґрунтування ширини робочого каналу решета інерційного прямооточного сепаратора. *Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин: Загальнодержавний міжвідомчий наук.-техн. збірник*. Кіровоград : КДТУ. 2002. Вип. 32. С. 121–124.
99. Плоске решето: пат.154304 Україна: МПК В07В 1/00. / 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/>.
100. Аналіз конструкцій плоских решіт зерноочисних машин / Бажан І. М., Олексієнко Д. С., Васильковський О. М., Лещенко С. М. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Досягнення та перспективи галузі виробництва, переробки і зберігання сільськогосподарської продукції»*. Кропивницький : ЦНТУ, 2023. С. 57–59.
101. Підручник дослідника: навч. посібник для студентів агротехнічних спеціальностей / О. М. Васильковський, С. М. Лещенко, К. В. Васильковська, Д. І. Петренко. Харків: Мачулін, 2016. 204 с.
102. 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. І. 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).
103. Основи наукових досліджень. Перші наукові кроки : навч. посіб. для студ. агротехн. спец. / О.М. Васильковський, С.М. Лещенко, К.В. Васильковська, Д.І. Петренко. Харків : Мачулін, 2019. 164 с.

104. Випробування сільськогосподарської техніки. Зерноочисні машини та агрегати. Зерноочисно-сушильні комплекси. Методи випробувань: СОУ 74.3-37-147:2004. Київ: Мінагрополітики України [чинний від 2006-08-01], 2006. 26 с.

105. Статистична обробка і оформлення результатів експериментальних досліджень (із досвіду написання дисертаційних робіт): навчальний посібник / Кисельов, О. В., Комарова, І. Б., Мілько, Д. О., Бакарджієв Р. О. ; за заг. ред. Д. О. Мілька; Інститут механізації тваринництва НААН. Електронний аналог друкованого видання (електронна книга). Запоріжжя : СТАТУС, 2017. 1181 с.

106. Нечаєв В.П., Берідзе Т.М., Кононенко В.В. Теорія планування експерименту : навч. посібник. К. : Кондор, 2005. 232 с.

107. Математичне моделювання процесів і систем : навч. посіб. / А.І. Жученко, Л.Р. Ладієва, М.С. Піргач, Я.Ю. Жураковський; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові данні (1 файл: 5,6 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 351 с.

108. Cramer H. Mathematical Methods of Statistics. Princeton University Press. 1999. 575 p.

109. Важинський С.Е., Щербак Т.І. Методика та організація наукових досліджень: навчальний посібник. Суми : СумДПУ імені А.С.Макаренка, 2016. 260 с.

110. ДСТУ 4138-2002. Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначення якості. [Чинний від 2004-01-01]. Київ : Держстандарт України, 2003. 174 с.

111. 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>.

112. Економіка підприємства : підручник : у 3 ч. Ч. 2 /А. А. Мазаракі, Г. В. Блакита, Г. В. Ситник та ін. ; за заг. ред. А. А. Мазаракі. Київ : Держ. торг.-екон. ун-т, 2023. 472 с.

113. Гринчуцький В. І. Економіка підприємства: навчальний посібник. 2-е вид. Київ : ЦУЛ, 2019. 304 с.
114. Проектування технологій та розрахунок витрат на вирощування сільськогосподарських культур: навч. посібник / за ред. Г.Є. Мазнева. Харків : «Майдан», 2009. 257 с.
115. Ільчук М.М., Зрібняк Л.Я., Мельник С.І. Організація і планування сільськогосподарського виробництва : підручник. К. : Вища освіта, 2013. 535 с.
116. Андрійчук В. Г. Економіка підприємств агропромислового комплексу : підручник. К. : КНЕУ, 2013. 779 с.
117. Яців І. Б. Конкурентоспроможність сільськогосподарських підприємств : монографія. Львів : Український бестселер, 2013. 427 с.
118. Васильковський, О. М. Енергетичний та економічний аналіз використання зерноочисних машин. *Пропозиція*. 2017. №1. С. 150–152.
119. ДСТУ 4397:2005. Методи економічного оцінювання техніки на етапі випробування. Національний стандарт України. Київ : Київспоживстандарт України, 2005. 23 с.
120. Зерноочищувальний сепаратор: пат. 553 Україна: МПК (2006) B07B 9/00. Заявник Відкрите акціонерне товариство "Хорольський механічний завод". № 99105723; заявл. 19.10.1999; опубл. 15.09.2000, Бюл. № 4.
121. Решітний сепаратор: пат. 48337: Україна, МПК B07B 13/07 (2006.01), A01D 41/12 (2006.01), B07B 1/00. / Васильковський М. І., Васильковський О. М., Мороз С. М. (Україна); заявник і патентотримач Кіровоградський державний технічний університет. №99126856; заявл. 16.12.1999; опубл. 15.08.2002, Бюл. № 8.
122. Решето: пат. 57101 Україна, МПК B07B 13/04 (2006.01). / Васильковський М. І., Васильковський О. М., Лузан П. Г., Мороз С. М. (Україна); заявник і патентотримач Кіровоградський державний технічний університет. №2000021149; заявл. 28.02.2000; опубл. 16.06.2003, Бюл. № 6.

123. Повітряно-решітний сепаратор: пат. 85117 Україна, МПК (2006) B07B 13/08 (2006.01), B07B 7/00, B02B 3/00. / Васильковський М. І., Васильковський О. М., Лещенко С. М., Мороз С. М., Нестеренко О. В. (Україна); заявник і патентотримач Васильковський Михайло Ігоревич. – №a200703659; заявл. 03.04.2007; опубл. 25.12.2008, Бюл. № 24.

124. Повітряно-гравітаційний сепаратор: пат. 50652 Україна МПК (2006) B07B4/08 / Степаненко С.П., Швидя В.О., Котов Б.І., Коваль Ю.Г. № u200909501; заявл. 16.09.2009; опубл. 25.06.2009, Бюл.№12. 4 с.

125. Решето: пат. 82093 Україна: МПК B07B 1/00 (2013.01). / Тіщенко Л. М., Харченко С. О., Пуха В. М., Карнадуд Р. В. Заявник і патентотримач Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка. № u201214385; заявл. 17.12.2012; опубл. 25.07.2013, Бюл. № 14/2013.

126. Решето: пат. 73742 Україна: МПК A01F12/44 (2006.01). / Малюта С.І. Заявник і патентотримач Таврійський державний агротехнологічний університет № u 2012 02348; заявл. 28.02.2012; опубл. 10.10.2012, Бюл.№ 19.

127. Ситовий сепаратор: пат. 115191 Україна: МПК (2017.01), A01F 12/44 (2006.01), B07B 1/00. / Заявник Верещинський О. П. № a201603746. заявл. 07.04.2016; опубл. 25.09.2017, Бюл.№ 18.

128. Сепаратор зерноочисний: пат. 127890 U, МПК (2018.01) B07B 1/00. / Заявник Савицький С. М., Колісник С. О., Дубовецький А. О. № u 2018 02500. заявл. 12.03.2018; опубл. 27.08.2018, Бюл. № 16.

129. Решето для очищення зернового вороху з отворами у вигляді овалу Кассіні: пат. 133625 Україна: МПК B07B 1/46 (2006.01). №u201812181 заявл. 10.12.2018; опубл. 10.04.2019, Бюл. №7. 4с.

130. Решето: пат. 152666 Україна: МПК (2006) B07B 1/00 B07B 13/075 (2006.01). / Суєтіна Д.О., Васильковський О.М., Мороз С.М., Лещенко С.М., Петренко Д.І., Нестеренко О.В., Васильковська К.В, Андрієнко О.О.; заявник і патентотримач Центральноукраїнський національний технічний університет. № u202202418; заявл. 04.07.2022; опубл. 29.03.2023, Бюл. № 13/2023.

131. Решето: пат. 153656 Україна: МПК (2006) B07B 1/00 B07B 13/07 (2006.01). / Мороз С.М.; Васильковський О.М.; Лещенко С.М.; Петренко Д.І.; Коваленко А.С.; Васильковський М.О.; Мороз А.С.; заявник і патентотримач Центральноукраїнський національний технічний університет № u202202417(22); заявл. 04.07.2022; опубл. 09.08.2023, Бюл. № 32/2023.

132. Спосіб інтенсифікації процесу сепарації сипких матеріалів на решетах: пат. 28310 Україна: МПК A01B 15/00 (2006). № u200705573. / Бакум М.В., Манчинський Ю. О., Горбатовський О.М.; Заявник і патентотримач Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка; заявл. 21.05.2007; опубл. 25.02.2010, Бюл. 4.

133. Спосіб інтенсифікації сепарації насінневих сумішей на плоских решетах: пат. 116550: Україна: МПК B07B13/04, B02C23/00 (2006.01). № u 2016 12422. / М.В. Бакум, С.О. Харченко; Заявник і патентотримач Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка; заявл. 28.12.2009; опубл. 25.06.2010, Бюл.№ 12, 2010 р.

134. Спосіб інтенсифікації просівання продовгуватих компонентів на решетах з прямокутними отворами: пат. 90719 Україна: МПК E06B 1/00 (2014.01). № u 2013 14840. / М. В. Бакум, О. Б. Козій, М. М. Майборода, Татарова Л.В.; власники М. В. Бакум, О. Б. Козій, М. М. Майборода, Татарова Л.В.; заявл. 18.12.2013; опубл. 10.06.2014, Бюл.№ 11.

135. Спосіб підвищення ефективності сепарації сипких матеріалів на решетах: пат. 158059: Україна: МПК B07B 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. Сіняєва; власник Держ. біотехн. ун-т.; заявл. 14.05.2024; опубл. 25.12.2024, Бюл.№ 52. 4 с.

ДОДАТКИ

**Програма для теоретичного обґрунтування параметрів плоского
решета, створена в мові програмування HTML5 / JavaScript
(ECMAScript 2015+) з використанням бібліотеки Chart.js v4.4.1
(побудова графіків)**

Середовище виконання: веб-браузер Google Chrome, без встановлення додаткового ПЗ.

Функціональні можливості програми:

- розрахунок ймовірності просіювання прохідних часток за формулами 2.1–2.7;
- визначення критичного кута відхилення отворів $\beta_{кр}$;
- моделювання динаміки частки в гравітаційному режимі (формули 2.13–2.25);
- моделювання динаміки частки в коливальному режимі (формули 2.36–2.75);
- перевірка показника кінематичного режиму $K < 1$.

Вхідні параметри: ширина та довжина отворів, ширина перетинок, кут нахилу решета, кут відхилення отворів, кут напряду коливань, амплітуда та кутова швидкість коливань, кут тертя, коефіцієнт опору шару.

Форма подання результатів: числові значення розрахункових показників та графічні залежності в інтерактивному режимі.

**Вихідний код програми для теоретичного обґрунтування
параметрів плоского решета**

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="uk">
<head>
<meta charset="UTF-8">
<meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
<title>Теоретичне обґрунтування параметрів плоского решета</title>
<script
src="https://cdnjs.cloudflare.com/ajax/libs/Chart.js/4.4.1/chart.umd.js
"></script>
<style>
```

```
@import
url('https://fonts.googleapis.com/css2?family=IBM+Plex+Sans:wght@300;400;500;600&family=IBM+Plex+Mono:wght@400;500&display=swap');

:root {
--bg: #f5f4f0;
--surface: #ffffff;
--surface2: #f0efe9;
--border: #d8d6ce;
--text: #1a1917;
--text2: #5a5852;
--text3: #8a8880;
--blue: #1a4f8a;
--blue-light: #e8eef6;
--green: #1a6640;
--green-light: #e8f4ee;
--red: #8a2020;
--red-light: #f4e8e8;
--amber: #7a4a10;
--amber-light: #f8f0e0;
--accent: #c0392b;
--font: 'IBM Plex Sans', sans-serif;
--mono: 'IBM Plex Mono', monospace;
}

* { box-sizing: border-box; margin: 0; padding: 0; }

body {
font-family: var(--font);
background: var(--bg);
color: var(--text);
font-size: 15px;
line-height: 1.6;
}

header {
background: var(--text);
color: #fff;
padding: 2rem 2.5rem;
border-bottom: 3px solid var(--accent);
}

header .institution {
font-size: 11px;
letter-spacing: 0.12em;
text-transform: uppercase;
color: #aaa;
margin-bottom: 0.5rem;
font-family: var(--mono);
}

header h1 {
font-size: 20px;
font-weight: 500;
line-height: 1.3;
margin-bottom: 0.25rem;
}

header .sub {
font-size: 13px;
color: #aaa;
font-family: var(--mono);
}
```

```

}
|
.container {
max-width: 1100px;
margin: 0 auto;
padding: 2rem 2rem 4rem;
}
|
/* TABS */
.tabs {
display: flex;
gap: 0;
border-bottom: 2px solid var(--border);
margin-bottom: 2rem;
overflow-x: auto;
}
|
.tab {
padding: 10px 20px;
font-size: 13px;
font-family: var(--font);
cursor: pointer;
border: none;
background: transparent;
color: var(--text2);
border-bottom: 2px solid transparent;
margin-bottom: -2px;
white-space: nowrap;
font-weight: 400;
letter-spacing: 0.01em;
transition: color 0.15s;
}
|
.tab:hover { color: var(--text); }
.tab.active {
color: var(--text);
border-bottom: 2px solid var(--accent);
font-weight: 500;
}
|
.panel { display: none; }
.panel.active { display: block; }
|
/* GRID */
.two-col {
display: grid;
grid-template-columns: 300px 1fr;
gap: 1.5rem;
align-items: start;
margin-bottom: 1.5rem;
}
|
@media (max-width: 700px) {
.two-col { grid-template-columns: 1fr; }
}
|
/* CONTROLS */
.controls {
background: var(--surface);
border: 1px solid var(--border);
border-radius: 6px;
padding: 1.25rem;
}

```



```
}  
|  
|.metric-value {  
font-size: 20px;  
font-weight: 500;  
font-family: var(--mono);  
color: var(--text);  
}  
|  
|.metric-value.good { color: var(--green); }  
|.metric-value.warn { color: var(--amber); }  
|.metric-value.bad { color: var(--red); }  
|  
|/* CHART AREA */  
|.chart-section {  
background: var(--surface);  
border: 1px solid var(--border);  
border-radius: 6px;  
padding: 1.25rem;  
margin-bottom: 1.5rem;  
}  
|  
|.chart-title {  
font-size: 12px;  
font-family: var(--mono);  
color: var(--text2);  
margin-bottom: 0.75rem;  
padding-bottom: 0.5rem;  
border-bottom: 1px solid var(--border);  
}  
|  
|.chart-wrap {  
position: relative;  
width: 100%;  
}  
|  
|/* FORMULA */  
|.formula-block {  
background: var(--surface2);  
border-left: 3px solid var(--blue);  
border-radius: 0 6px 6px 0;  
padding: 0.85rem 1.1rem;  
font-family: var(--mono);  
font-size: 12.5px;  
line-height: 1.9;  
color: var(--text);  
margin-bottom: 1.25rem;  
}  
|  
|.formula-block .fline { color: var(--text2); }  
|.formula-block .fvar { color: var(--blue); font-weight: 500; }  
|  
|/* INFO */  
|.info-block {  
font-size: 13px;  
color: var(--text2);  
line-height: 1.7;  
margin-bottom: 1.25rem;  
padding: 0.75rem 1rem;  
background: var(--blue-light);  
border-radius: 6px;  
border-left: 3px solid var(--blue);
```



```

}
}
.conclusion-list li {
padding: 0.6rem 0.75rem;
border-bottom: 1px solid var(--border);
font-size: 13px;
line-height: 1.6;
color: var(--text2);
display: flex;
gap: 0.75rem;
align-items: baseline;
}
}
.conclusion-list li .num {
font-family: var(--mono);
font-size: 11px;
color: var(--accent);
font-weight: 600;
min-width: 20px;
flex-shrink: 0;
}
}
footer {
background: var(--text);
color: #888;
text-align: center;
padding: 1rem;
font-size: 11px;
font-family: var(--mono);
margin-top: 4rem;
}
}
</style>
</head>
<body>
<header>
<div class="institution">Розділ 2 · Дисертаційна робота</div>
<h1>Теоретичне обґрунтування параметрів плоского решета</h1>
<div class="sub">Інтерактивна розрахункова програма · HTML5 /
JavaScript · Chart.js 4.4.1</div>
</header>
<div class="container">
<div class="tabs">
<button class="tab active" onclick="switchTab('prob', this)">§2.1
Ймовірність просіювання</button>
<button class="tab" onclick="switchTab('grav', this)">§2.2
Травітаційний рух</button>
<button class="tab" onclick="switchTab('vib', this)">§2.3 Коливальний
режим</button>
<button class="tab" onclick="switchTab('sum', this)">Зведені
висновки</button>
</div>
<!-- ===== PANEL 1: PROBABILITY ===== -->
<div class="panel active" id="panel-prob">
<div class="info-block">
Аналіз ймовірності потрапляння прохідних часток в площину отворів
класичного та оригінального решіт із зигзагоподібно розташованими
отворами (формули 2.1-2.7).

```



```

<div class="metrics" id="metrics-prob"></div>
<div class="chart-section">
<div class="chart-title">Рис. 2.4 – Ймовірність потрапляння  $P_x(\beta)$  від
кута нахилу отворів</div>
<div class="legend">
<div class="leg-item"><div class="leg-line"
style="background:#1a4f8a"></div>1 = 20 мм</div>
<div class="leg-item"><div class="leg-line"
style="background:#1a6640"></div>1 = 25 мм</div>
<div class="leg-item"><div class="leg-line"
style="background:#8a2020"></div>1 = 30 мм</div>
<div class="leg-item"><div class="leg-dash" style="border-
color:#aaa"></div>100% межа</div>
</div>
<div class="chart-wrap" style="height:260px">
<canvas id="chart-prob1" role="img" aria-label="Ймовірність від кута
 $\beta$ "></canvas>
</div>
</div>
<div class="chart-section">
<div class="chart-title">Рис. 2.3 – Загальна ймовірність  $P$  від ширини
отвору  $b_0$ </div>
<div class="legend">
<div class="leg-item"><div class="leg-line"
style="background:#1a4f8a"></div> $b_p = b_l = 4$  мм</div>
<div class="leg-item"><div class="leg-line"
style="background:#1a6640"></div> $b_p = b_l = 3$  мм</div>
<div class="leg-item"><div class="leg-line"
style="background:#8a2020"></div> $b_p = b_l = 2$  мм</div>
</div>
<div class="chart-wrap" style="height:220px">
<canvas id="chart-prob2" role="img" aria-label="Загальна ймовірність
від  $b_0$ "></canvas>
</div>
</div>
</div>
</div>
</div>
</div>
</div>
</div>
<!-- ===== PANEL 2: GRAVITATIONAL ===== -->
<div class="panel" id="panel-grav">
<div class="info-block">
Швидкість непрохідної частки на похилому нерухомому решеті. Аналітичне
розв'язання диференціального рівняння руху (формули 2.9–2.25).
Порівняння класичного ( $\beta=0$ ) та оригінального решіт.
</div>
<div class="formula-block">
<span class="fline">Рівняння руху:</span>  $m \cdot \ddot{x} = m \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta -$ 
 $F_{\text{тертя}} - F_{\text{ш}} \quad [2.9]$  <br>
<span class="fvar"> $A_0$ </span>  $= g \cdot (\sin \alpha \cdot \cos \beta - \tan \varphi \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta)$ 
<br>
<span class="fvar"> $V(x)$ </span>  $= \sqrt{2 \cdot A_0 \cdot x}$ 
<br>
<span class="fline">Умова руху:</span>  $\alpha + \beta > \varphi$ 

```

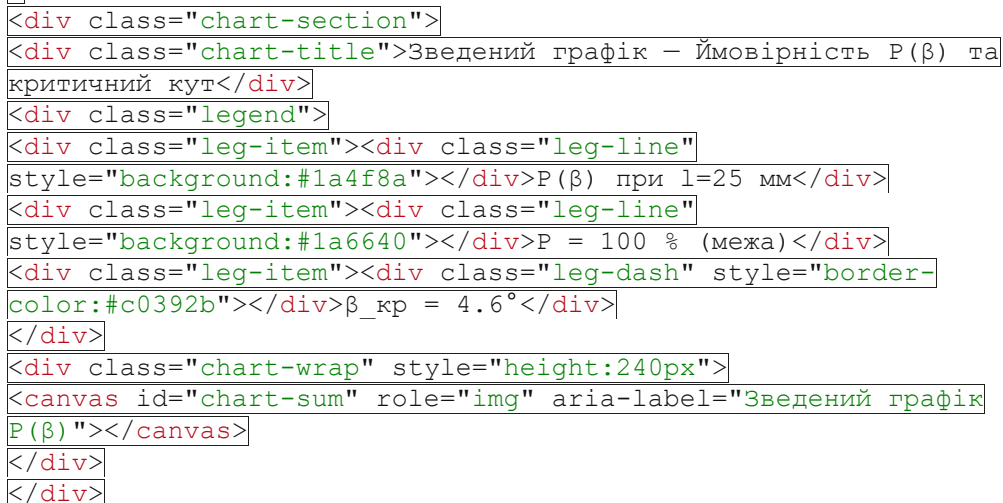


```

<div class="ctrl-label">Опір шару k (кГ/с) <span class="ctrl-val"
id="kresv">0.000</span></div>
<input type="range" min="0" max="0.05" step="0.005" value="0" id="kres"
oninput="renderVib()">
</div>
</div>
<div>
<div class="metrics" id="metrics-vib"></div>
<div class="chart-section">
<div class="chart-title">Рис. 2.9-2.10 – Швидкість Vч від переміщення
(коливальне решето)</div>
<div class="legend">
<div class="leg-item"><div class="leg-line"
style="background:#1a4f8a"></div> $\alpha = 8^\circ$ </div>
<div class="leg-item"><div class="leg-line"
style="background:#1a6640"></div> $\alpha = 12^\circ$ </div>
<div class="leg-item"><div class="leg-line"
style="background:#8a2020"></div> $\alpha = 20^\circ$ </div>
<div class="leg-item"><div class="leg-dash" style="border-
color:#1a4f8a"></div>класичне  $\beta=0$  ( $\alpha=8^\circ$ )</div>
<div class="leg-item"><div class="leg-dash" style="border-
color:#1a6640"></div>класичне  $\beta=0$  ( $\alpha=12^\circ$ )</div>
</div>
<div class="chart-wrap" style="height:280px">
<canvas id="chart-vib" role="img" aria-label="Vч(x) вібраційний
режим"></canvas>
</div>
</div>
<div class="chart-section">
<div class="chart-title">Рис. 2.11 – Вплив кута  $\beta$  на швидкість
переміщення (при поточних  $\alpha, \theta, \omega, A$ )</div>
<div class="legend">
<div class="leg-item"><div class="leg-line"
style="background:#1a4f8a"></div>Vч( $\beta$ ) – оригінальне</div>
<div class="leg-item"><div class="leg-dash" style="border-
color:#aaa"></div> $\beta = 0$  – класичне</div>
</div>
<div class="chart-wrap" style="height:200px">
<canvas id="chart-beta" role="img" aria-label="Вплив  $\beta$  на кінцеву
швидкість"></canvas>
</div>
</div>
</div>
</div>
</div>
</div>
</div>
</div>
<!-- ===== PANEL 4: SUMMARY ===== -->
<div class="panel" id="panel-sum">
<div class="info-block">
Зведені результати теоретичного дослідження параметрів плоского решета
із зигзагоподібно розташованими отворами.
</div>
<table class="summary-table">
<thead>
<tr>
<th>Параметр</th>
<th>Значення</th>
<th>Умова / Режим</th>

```

Оцінка		
Ймовірність P при $\beta = 0^\circ$	50 %	Класичне решето
Ймовірність P при $\beta \geq \beta_{кр}$	100 %	Детермінований процес
Критичний кут $\beta_{кр}$ ($l=25$ мм, $b_p=2$ мм)	4.6°	$\arctan(b_p/l)$
Зниження швидкості V (гравіт. режим, $\beta=10^\circ$, $\alpha=45^\circ$)	$\alpha + \beta > \varphi$	суттєве
Зниження швидкості V (вібрац. режим, $\beta=10^\circ$)	$\alpha + \beta \leq \varphi$	несуттєве
Раціональний кут напряду коливань θ	$60 - 70^\circ$	$\theta < 1$ (безвідривний рух)
Показник кінематичного режиму K	$\theta < 1$	Умова безвідривного руху
Раціональний діапазон β	$0 - 10^\circ$	Обидва режими



- Висновки по розділу 2

 - 1. Запропоновано фізичну модель просіювання пласкої частки крізь решето із прямокутними зигзагоподібно розташованими отворами і отримано аналітичну залежність ймовірності просіювання від основних параметрів решета.
 - 2. Обґрунтовано критичний кут $\beta_{кр} = \arctan(b_p/l)$. При $\beta \geq \beta_{кр}$ процес сепарації набуває детермінованого характеру. Для решета 2×25 мм: $\beta_{кр} \geq 4.6^\circ$.
 - 3. Розроблено і вирішено ДР переміщення непрохідної частки по нерухомому решету з урахуванням кута β та сили опору шару. Збільшення β до 10° знижує швидкість більш ніж на 20% ($\alpha = 45^\circ$).


```

const b0 = gv('b0'), l = gv('l'), bp = gv('bp'), bl = gv('bl'), betaDeg
= gv('beta');
sv('b0v', b0, 1); sv('lv', l, 0); sv('bpv', bp, 1); sv('blv', bl, 1);
sv('betav', betaDeg, 1);
[]
const beta = betaDeg * DEG;
const Px = b0 / (b0 + bp);
const Py = l / (l + bl);
const Pcl = Px * Py;
const PxB = Math.min(1, (b0 * Math.cos(beta) + l * Math.sin(beta)) /
(b0 + bp));
const bcrDeg = Math.atan(bp / l) / DEG;
[]
const clsP = Pcl < 0.35 ? 'bad' : Pcl < 0.55 ? 'warn' : 'good';
const clsPb = PxB >= 1 ? 'good' : PxB > 0.7 ? 'warn' : 'bad';
[]
document.getElementById('metrics-prob').innerHTML =
makeMetric('Px (класичне)', (Px * 100).toFixed(1) + '%') +
makeMetric('Py', (Py * 100).toFixed(1) + '%') +
makeMetric('P класичне', (Pcl * 100).toFixed(1) + '%', clsP) +
makeMetric('Px(β) оригінальне', (PxB * 100).toFixed(1) + '%', clsPb) +
makeMetric('β кр (°)', bcrDeg.toFixed(1) + '°') +
makeMetric(betaDeg >= bcrDeg ? 'Режим' : 'Режим', betaDeg >= bcrDeg ?
'Детермін.' : 'Ймовірн.', betaDeg >= bcrDeg ? 'good' : 'warn');
[]
// Chart 1: Px(beta) for l=20,25,30
const angles = Array.from({ length: 121 }, ( , i) => i * 0.25);
const mkDS1 = (l, col, dash) => ({
label: 'l=' + l,
data: angles.map(a => {
const r = a * DEG;
return Math.min(100, (b0 * Math.cos(r) + l * Math.sin(r)) / (b0 + bp)
* 100);
}),
borderColor: col, backgroundColor: 'transparent',
borderWidth: 2, borderDash: dash || [], tension: 0.3, pointRadius: 0
});
[]
destroyChart('prob1');
charts['prob1'] = new Chart(document.getElementById('chart-prob1'), {
type: 'line',
data: {
labels: angles,
datasets: [
mkDS1(20, '#1a4f8a'),
mkDS1(25, '#1a6640'),
mkDS1(30, '#8a2020'),
{ label: '100%', data: angles.map(() => 100), borderColor: '#aaa',
borderDash: [5, 4], borderWidth: 1.5, pointRadius: 0, backgroundColor:
'transparent', tension: 0 },
{ label: 'βкр', data: angles.map(a => Math.abs(a - bcrDeg) < 0.15 ? 105
: null), borderColor: '#c0392b', borderDash: [3, 3], borderWidth: 1.5,
pointRadius: 0, backgroundColor: 'transparent' }
]
},
options: {
responsive: true, maintainAspectRatio: false,
plugins: { legend: { display: false }, tooltip: { callbacks: { title: t
=> 'β = ' + parseFloat(t[0].label).toFixed(1) + '°', label: c =>
c.dataset.label + ': ' + c.parsed.y.toFixed(1) + '%' } } },

```

```

scales: { x: { title: { display: true, text: 'Кут  $\beta$  ( $^\circ$ )' }, ticks: {
maxTicksLimit: 13, callback: v => Number(angles[v]).toFixed(0) } }, y:
{ title: { display: true, text: 'Px( $\beta$ ) (%)' }, min: 0, max: 115 } }
}
});
}
// Chart 2: P vs b0
const b0range = Array.from({ length: 91 }, ( , i) => (i * 0.05 + 0.5));
const mkDS2 = (bpbl, col) => ({
label: 'bp=b1=' + bpbl,
data: b0range.map(bb => (bb / (bb + bpbl)) * (1 / (1 + bpbl)) * 100),
borderColor: col, backgroundColor: 'transparent', borderWidth: 2,
tension: 0.3, pointRadius: 0
});
}
destroyChart('prob2');
charts['prob2'] = new Chart(document.getElementById('chart-prob2'), {
type: 'line',
data: { labels: b0range.map(v => v.toFixed(1)), datasets: [mkDS2(4,
'#1a4f8a'), mkDS2(3, '#1a6640'), mkDS2(2, '#8a2020')] },
options: {
responsive: true, maintainAspectRatio: false,
plugins: { legend: { display: false } },
scales: { x: { title: { display: true, text: 'Ширина отвору b0 (мм)' },
ticks: { maxTicksLimit: 10 } }, y: { title: { display: true, text: 'P
(%)' }, min: 0, max: 65 } }
}
});
}
}
// =====
// §2.2 ГРАВІТАЦІЙНИЙ
// =====
function calcA0(alphaDeg, betaDeg, phiDeg) {
const a = alphaDeg * DEG, b = betaDeg * DEG, p = phiDeg * DEG;
return g * (Math.sin(a) * Math.cos(b) - Math.tan(p) * Math.cos(a) *
Math.cos(b));
}
}
function velGrav(A0, x m) {
if (A0 <= 0) return 0;
return Math.sqrt(Math.max(0, 2 * A0 * x m));
}
}
function renderGrav() {
const alpha = gv('alpha'), beta2 = gv('beta2'), phi = gv('phi'), l2 =
gv('l2');
sv('alphav', alpha, 0); sv('beta2v', beta2, 0); sv('phiv', phi, 0);
sv('l2v', l2, 0);
}
const A0 = calcA0(alpha, beta2, phi);
const A0_b0 = calcA0(alpha, 0, phi);
const l m = l2 / 1000;
const vl = velGrav(A0, l m) * 1000;
const vl0 = velGrav(A0_b0, l m) * 1000;
const dv = vl0 > 0.001 ? ((vl0 - vl) / vl0 * 100) : 0;
const mode = (alpha + beta2) > phi ? 'Гравіт.' : 'Спокій';
}
document.getElementById('metrics-grav').innerHTML =
makeMetric('Режим', mode, (alpha + beta2) > phi ? 'good' : 'bad') +
makeMetric('A0 (м/с2)', A0.toFixed(3)) +

```

```

makeMetric('V при x=1 (мм/с)', A0 > 0 ? vl.toFixed(0) : '-', A0 > 0 ?
'good' : 'bad') +
makeMetric('Зниж. V vs  $\beta=0$  (%)', dv.toFixed(1) + '%', dv > 10 ? 'good'
: dv > 3 ? 'warn' : '');
]
const N = 120;
const xs = Array.from({ length: N }, ( , i) => i * l m / (N - 1));
]
const mkDS = (a, b, col, dash) => ({
label: ' $\alpha$ ' + a + ' $^\circ$   $\beta$ ' + b + ' $^\circ$ ',
data: xs.map(x => ({ x: x * 1000, y: velGrav(calCA0(a, b, phi), x) *
1000 })),
borderColor: col, backgroundColor: 'transparent', showLine: true,
borderWidth: 2, borderDash: dash || [], pointRadius: 0
});
]
destroyChart('grav');
charts['grav'] = new Chart(document.getElementById('chart-grav'), {
type: 'scatter',
data: {
datasets: [
mkDS(30, beta2, '#1a4f8a'),
mkDS(45, beta2, '#1a6640'),
mkDS(60, beta2, '#8a2020'),
mkDS(30, 0, '#1a4f8a', [5, 4]),
mkDS(45, 0, '#1a6640', [5, 4]),
mkDS(60, 0, '#8a2020', [5, 4])
]
},
options: {
responsive: true, maintainAspectRatio: false,
plugins: { legend: { display: false }, tooltip: { callbacks: { label: c
=> 'V = ' + c.parsed.y.toFixed(1) + ' мм/с при x = ' +
c.parsed.x.toFixed(1) + ' мм' } } },
scales: { x: { title: { display: true, text: 'Переміщення x (мм)' },
min: 0 }, y: { title: { display: true, text: 'Швидкість V (мм/с)' },
min: 0 } }
}
});
]
]
// =====
// §2.3 КОЛИВАЛЬНИЙ – Рунге-Кутта 4-го порядку
// =====
function rkSolve(alphaDeg, betaDeg, thetaDeg, omega, A_m, phiDeg, k,
tMax, dt) {
const a = alphaDeg * DEG, b = betaDeg * DEG, th = thetaDeg * DEG, p =
phiDeg * DEG;
const m = 0.001;
const B0 = k / m;
const A0 = g * (Math.sin(a) * Math.cos(b) - Math.tan(p) * Math.cos(a) *
Math.cos(b));
const Ph = Math.sin(th) * Math.cos(b) - Math.tan(p) * Math.cos(th) *
Math.cos(b);
const f = (t, v) => A0 - B0 * v + Ph * A_m * omega * omega *
Math.cos(omega * t);
]
let t = 0, v = 0, x = 0;
const pts = [{ x: 0, y: 0 }];
while (t < tMax && x < 0.04) {
const k1 = f(t, v);
const k2 = f(t + dt/2, v + k1*dt/2);

```

```

const k3 = f(t + dt/2, v + k2*dt/2);
const k4 = f(t + dt, v + k3*dt);
v += dt * (k1 + 2*k2 + 2*k3 + k4) / 6;
if (v < 0) v = 0;
x += v * dt;
t += dt;
pts.push({ x: x * 1000, y: v * 1000 });
}
return { pts, A0, Ph, B0 };
}
}

function thinPts(arr, n = 150) {
const step = Math.max(1, Math.ceil(arr.length / n));
return arr.filter((, i) => i % step === 0 || i === arr.length - 1);
}

function renderVib() {
const a3 = gv('alpha3'), b3 = gv('beta3'), th = gv('theta'),
om = gv('omega'), A_mm = gv('amp'), p3 = gv('phi3'), k = gv('kres');
sv('alpha3v', a3, 0); sv('beta3v', b3, 0); sv('thetav', th, 0);
sv('omegav', om, 0); sv('ampv', A_mm, 1); sv('phi3v', p3, 0);
sv('kresv', k, 3);

const A_m = A_mm / 1000;
const tMax = 3, dt = 0.001;

const s8 = rkSolve(8, b3, th, om, A_m, p3, k, tMax, dt);
const s12 = rkSolve(12, b3, th, om, A_m, p3, k, tMax, dt);
const s20 = rkSolve(20, b3, th, om, A_m, p3, k, tMax, dt);
const s8b = rkSolve(8, 0, th, om, A_m, p3, k, tMax, dt);
const s12b = rkSolve(12, 0, th, om, A_m, p3, k, tMax, dt);

const K = A_m * om * om * Math.cos(th * DEG) / (g * Math.cos(a3 *
DEG));
const vEnd = arr => arr.pts[arr.pts.length - 1]??.y ?? 0;
const dv3 = vEnd(s8b) > 0.01 ? ((vEnd(s8b) - vEnd(s8)) / vEnd(s8b) *
100) : 0;

document.getElementById('metrics-vib').innerHTML =
makeMetric('K (кінем. режим)', K.toFixed(3), K < 1 ? 'good' : 'bad') +
makeMetric('A0 (м/с2)', s8.A0.toFixed(4)) +
makeMetric('Φ0', s8.Ph.toFixed(4)) +
makeMetric('Зниж. V β vs 0 (%)', Math.abs(dv3).toFixed(1) + '%',
Math.abs(dv3) > 5 ? 'good' : 'warn') +
makeMetric('Режим β+α vs φ', (a3 + b3) > p3 ? 'Гравіт.' : 'Вібрац.',
(a3 + b3) > p3 ? 'warn' : 'good');

destroyChart('vib');
charts['vib'] = new Chart(document.getElementById('chart-vib'), {
type: 'scatter',
data: {
datasets: [
{ label: 'α=8°', data: thinPts(s8.pts), borderColor: '#1a4f8a',
showLine: true, pointRadius: 0, borderWidth: 2, backgroundColor:
'transparent' },
{ label: 'α=12°', data: thinPts(s12.pts), borderColor: '#1a6640',
showLine: true, pointRadius: 0, borderWidth: 2, backgroundColor:
'transparent' },
{ label: 'α=20°', data: thinPts(s20.pts), borderColor: '#8a2020',
showLine: true, pointRadius: 0, borderWidth: 2, backgroundColor:
'transparent' },

```

```

    { label: 'α=8°,β=0', data: thinPts(s8b.pts), borderColor: '#1a4f8a',
    showLine: true, pointRadius: 0, borderWidth: 1.5, borderDash: [5, 4],
    backgroundColor: 'transparent' },
    { label: 'α=12°,β=0', data: thinPts(s12b.pts), borderColor: '#1a6640',
    showLine: true, pointRadius: 0, borderWidth: 1.5, borderDash: [5, 4],
    backgroundColor: 'transparent' }
  ],
  },
  options: {
    responsive: true, maintainAspectRatio: false,
    plugins: { legend: { display: false }, tooltip: { callbacks: { label: c
=> 'Vч = ' + c.parsed.y.toFixed(1) + ' мм/с x = ' +
c.parsed.x.toFixed(1) + ' мм' } } } },
    scales: { x: { title: { display: true, text: 'Переміщення x (мм)' },
min: 0 }, y: { title: { display: true, text: 'Швидкість Vч (мм/с)' },
min: 0 } }
  }
});
// Beta-effect chart
const betas = [0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 15];
const vb0 = rkSolve(a3, 0, th, om, A_m, p3, k, tMax, dt);
const vRef = vEnd(vb0);
destroyChart('beta');
charts['beta'] = new Chart(document.getElementById('chart-beta'), {
  type: 'line',
  data: {
    labels: betas,
    datasets: [
      {
        label: 'Vч(β)', pointRadius: 4, borderWidth: 2, tension: 0.3,
        borderColor: '#1a4f8a', backgroundColor: '#1a4f8a',
        data: betas.map(b => { const s = rkSolve(a3, b, th, om, A_m, p3, k,
tMax, dt); return vEnd(s); })
      },
      {
        label: 'β=0', pointRadius: 0, borderWidth: 1.5, tension: 0,
        borderColor: '#aaa', borderDash: [5, 4], backgroundColor:
'transparent',
        data: betas.map(() => vRef)
      }
    ]
  },
  options: {
    responsive: true, maintainAspectRatio: false,
    plugins: { legend: { display: false } },
    scales: { x: { title: { display: true, text: 'Кут β (°)' } }, y: {
title: { display: true, text: 'Vч в кінці (мм/с)' } } }
  }
});
// =====
// ЗВЕДЕНИЙ ГРАФІК
// =====
function renderSum() {
  const betas = Array.from({ length: 61 }, ( , i) => i * 0.5);
  const b0 = 2, l = 25, bp = 2;
  const bcrDeg = Math.atan(bp / l) / DEG;

```

```

destroyChart('sum');
charts['sum'] = new Chart(document.getElementById('chart-sum'), {
  type: 'line',
  data: {
    labels: betas,
    datasets: [
      {
        label: 'P( $\beta$ )', data: betas.map(a => { const r = a * DEG; return
Math.min(100, (b0 * Math.cos(r) + 1 * Math.sin(r)) / (b0 + bp) * 100);
}),
        borderColor: '#1a4f8a', backgroundColor: 'rgba(26,79,138,0.08)', fill:
true, borderWidth: 2, tension: 0.3, pointRadius: 0
      },
      {
        label: '100%', data: betas.map(() => 100),
        borderColor: '#1a6640', borderDash: [4, 4], borderWidth: 1.5,
        pointRadius: 0, backgroundColor: 'transparent'
      },
      {
        label: ' $\beta_{кр}$ ',
        data: betas.map(a => Math.abs(a - bcrDeg) < 0.3 ? 105 : null),
        borderColor: '#c0392b', borderDash: [3, 3], borderWidth: 2,
        pointRadius: 0, backgroundColor: 'transparent'
      }
    ]
  },
  options: {
    responsive: true, maintainAspectRatio: false,
    plugins: { legend: { display: false }, annotation: {} },
    scales: {
      x: { title: { display: true, text: 'Кут  $\beta$  ( $^{\circ}$ )' }, ticks: {
maxTicksLimit: 13, callback: (v) => Number(betas[v]).toFixed(0) } },
      y: { title: { display: true, text: 'Ймовірність P (%)' }, min: 0, max:
115 }
    }
  }
});
// =====
// ІНІЦІАЛІЗАЦІЯ
// =====
window.addEventListener('DOMContentLoaded', () => { renderProb(); });
</script>
</body>
</html>

```

Додаток Б

Патент №154304 Плоске решето



НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 154304

ПЛОСКЕ РЕШЕТО

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі України корисних моделей
01.11.2023.

Директор
Державної організації «Український
національний офіс інтелектуальної
власності та інновацій»

О.П. Орлюк





УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **154304** (13) **U**
(51) МПК (2023.01)
A01F 12/00
B07B 13/02 (2006.01)
B07B 1/00

НАЦІОНАЛЬНИЙ ОРГАН
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ВЛАСНОСТІ
ДЕРЖАВНА ОРГАНІЗАЦІЯ
"УКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ОФІС ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ ТА ІННОВАЦІЙ"

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

<p>(21) Номер заявки: u 2023 02258</p> <p>(22) Дата подання заявки: 12.05.2023</p> <p>(24) Дата, з якої є чинними права інтелектуальної власності: 02.11.2023</p> <p>(46) Публікація відомостей про державну реєстрацію: 01.11.2023, Бюл.№ 44</p>	<p>(72) Винахідник(и): Олексієнко Дмитро Сергійович (UA), Бажан Ігор Миколайович (UA), Лещенко Сергій Миколайович (UA), Васильковський Олексій Михайлович (UA), Петренко Дмитро Іванович (UA), Мороз Сергій Миколайович (UA)</p> <p>(73) Володілець (володільці): ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, просп. Університетський, 8, м. Кропивницький, Кіровоградська обл., 25006 (UA)</p>
---	---

(54) ПЛОСКЕ РЕШЕТО

(57) Реферат:

Плоске решето виконане з прямокутними отворами, розташованими рядами, довгою стороною відносно поздовжньої осі. Кожен ряд отворів розташовано під нахилом 3...5 градусів до поздовжньої осі решета, причому лівий та правий нахили кожного ряду отворів чергуються у шаховому порядку.

UA 154304 U

Корисна модель належить до сільськогосподарської техніки, зокрема стосується машин для просіювання та очищення зерна та насіння різних сільськогосподарських культур, а також може бути використана в інших галузях для вказаних цілей.

Відомими та найбільш близькими за технічною суттю та досягнутим результатом до корисної моделі є плоскі решета, такі, які встановлюються на зерноочисні машини, наприклад на машини ОВС-25, СВУ-10, СМ-4А [1...3] та ін. В більшості зерноочисних машин для розділення зерна та насіння використовуються плоскі решета, в яких прямокутні отвори розташовані рядами, із орієнтацією довгої сторони отвору відносно поздовжньої осі.

Недоліком плоского решета з прямокутними отворами, розташованими рядами, довгою стороною відносно поздовжньої осі, є недостатня ефективність просіювання часток. Це відбувається внаслідок того, що зерно, яке знаходиться над поздовжніми перетинками, може не потрапити до отворів решета, внаслідок відсутності сил, діючих у поперечному напрямку, які б орієнтували частки, спрямовуючи їх до отворів.

Задачею корисної моделі є підвищення ефективності просіювання часток крізь отвори плоского решета за рахунок підвищення ймовірності потрапляння часток на отвори незалежно від місця руху останніх по робочій поверхні решета.

Поставлена задача вирішується тим, що в решеті, яке виконане з прямокутними отворами, розташованими рядами, довгою стороною відносно поздовжньої осі, згідно з корисною моделлю, кожен ряд отворів розташовано під нахилом 3...5 градусів до поздовжньої осі решета, причому лівий та правий нахили кожного ряду отворів чергуються у шаховому порядку.

Така конструкція плоского решета дозволяє усунути недоліки решета з прямокутними отворами, розташованими рядами, довгою стороною відносно поздовжньої осі. Завдяки новій конструкції із розташуванням кожного ряду отворів під кутом 3...5 градусів до поздовжньої осі решета із чергуванням лівого і правого нахилів отворів у шаховому порядку збільшиться ймовірність потрапляння часток до отворів решета.

Суть корисної моделі пояснюється кресленням. Плоске решето складається із робочої поверхні решета 1 та розміщених на робочій поверхні отворів 2, що розташовані рядами по всій площі решета із орієнтацією довгою стороною отворів відносно поздовжньої осі. На робочій площині решета кожен ряд отворів розташовано під нахилом 3...5 градусів до поздовжньої осі, а лівий та правий нахили кожного ряду отворів чергуються у шаховому порядку.

Плоске решето працює таким чином. Під час руху зерна по площині плоского решета 1, частинки потрапляють в отвори 2 та просіюються. Ті частинки зернової суміші, які не потрапили до отворів внаслідок руху по поверхні решета між отворами, гарантовано потраплять до отворів в процесі подальшого поздовжнього переміщення, що досягається завдяки нахилу отворів до поздовжньої осі та чергування по рядах отворів лівого і правого нахилу у шаховому порядку.

Таким чином, корисна модель дозволяє підвищити ймовірність потрапляння зерна до отворів і вирішити задачу підвищення ефективності решітного очищення.

Джерела інформації:

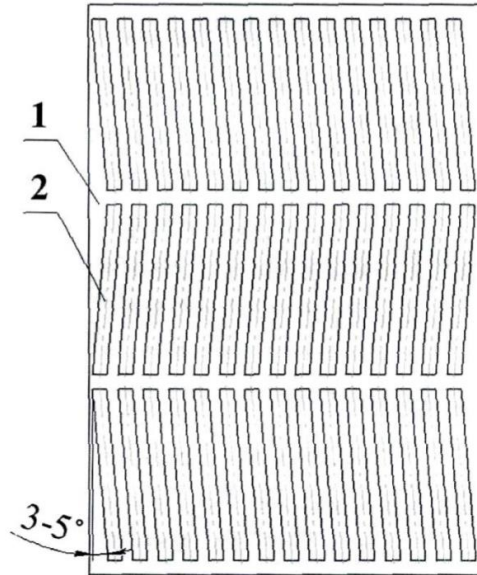
1. Сільськогосподарські та меліоративні машини: Підручник / Д.Г. Войтюк, В.О. Дубровін, Т.Д. Іщенко та ін.; За ред. Д.Г. Войтюка. - К.: Вища освіта, 2004. - 544 с.

2. Сисолін П.В. Сільськогосподарські машини: теоретичні основи, конструкція, проектування. Книга 3. Машини та обладнання для переробки зерна та насіння / Сисолін П.В., Петренко М.М., Свірень М.О. За ред. Черновола М.І. - К.: Фенікс, 2007. - 432 с.

3. Патент на корисну модель (Україна) № 116595; МПК В07В 1/00, В07В 13/04. Універсальне решето з прямокутними отворами. / Харченко С.О., Бакум М.В. Власник: Харченко С.О., Бакум М.В. - № U2016 12915, заявл. 19.12.2016; опубл. 25.05.2017 бюл. № 10/2017.

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

Плоске решето, що виконане з прямокутними отворами, розташованими рядами, довгою стороною відносно поздовжньої осі, яке **відрізняється** тим, що кожен ряд отворів розташовано під нахилом 3...5 градусів до поздовжньої осі решета, причому лівий та правий нахили кожного ряду отворів чергуються у шаховому порядку.



Акти впровадження результатів досліджень та виробничих випробувань

УЗГОДЖЕНО

Фінансовий директор

Миколи ЗАБЛОДСЬКОГО

«20» сечня 2026 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ПП ВК «Технополь»

Вадим МАЄВСЬКИЙ

«20» сечня 2026 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи у виробництво

м. Кропивницький

«20» сечня 2026 р.

Комісія у складі представників приватного підприємства ВК «Технополь» (м. Кропивницький): директора Маєвського Вадима Валентиновича, фінансового директора Заблодського Миколи Сергійовича, головного конструктора Дайнекіна Сергія, головного технолога Жабокридського Олександра склала цей акт про таке.

Асистентом кафедри сільськогосподарського машинобудування Центральноукраїнського національного технічного університету **Бажаном Ігорем Миколайовичем** виконано дисертаційну роботу на тему: «Обґрунтування параметрів плоского коливального решета».

У виробництво ПП ВК «Технополь» впроваджено такі результати зазначеної дисертаційної роботи:

№	Найменування результату, що впроваджується	Форма впровадження
1	Конструктивне рішення плоского решета розміром 990×740 мм із зигзагоподібно розташованими продовгуватими отворами розміром 2×25 мм, відхиленими від поздовжньої осі решета на кут ±10°	Використання розробленого креслення решета при виготовленні запасних частин зернових сепараторів
2	Параметри раціонального режиму роботи зерноочисних машин при використанні решіт з зигзагоподібно розташованими отворами	Рекомендації споживачеві по використанню решіт з зигзагоподібно розташованими отворами при заміні стандартних

Очікуваний економічний та виробничий ефект від впровадження:

Застосування розробленого конструктивного рішення плоского коливального решета із зигзагоподібним розташуванням продовгуватих отворів забезпечує підвищення повноти розділення зерна порівняно зі стандартними решетами з рядковим розташуванням отворів.

Акт складено в двох примірниках, по одному для кожної зі сторін.

Підписи сторін:

Головний конструктор

Сергій ДАЙНЕКІН

Виконавець дисертаційної роботи,
асистент кафедри с.-г.
машинобудування ЦНТУ

Ігор БАЖАН

Головний технолог

Олександр ЖАБОКРИДСЬКИЙ



ЗАТВЕРДЖУЮ

Голова ФГ "ЛК"

Владислав ЛЕВАНДОВСЬКИЙ

"16" липня 2025 р.

АКТ

виробничих випробувань зерноочисної машини ОВС-25 з удосконаленими підсівними решетами

с. Нова Прага, Кіровоградська обл.

"16" липня 2025 р.

Комісія у складі: представників кафедри сільськогосподарського машинобудування Центральноукраїнського національного технічного університету – доцента **Лещенка Сергія Миколайовича**, доцента **Кісільова Руслана Вікторовича**, асистента **Бажана Ігоря Миколайовича**, голови фермерського господарства «ЛК» **Левандовського Владислава Васильовича**, провела виробничі випробування зерноочисної машини **ОВС-25**, оснащеної підсівними решетами з зигзагоподібно розташованими продовгуватими отворами розміром 2×25 мм, та склала цей акт про таке.

1. Умови проведення випробувань

Місце проведення: фермерське господарство «ЛК», с. Нова Прага, Кіровоградська область.

Культура: ячмінь – зерновий ворох природньої вологості і засміченості після збирання прямим комбайнуванням.

Машина: зерноочисна ОВС-25 у двох комплектаціях: зі стандартними підсівними решетами та з удосконаленими решетами з зигзагоподібним розташуванням отворів 2×25 мм.

2. Результати випробувань

У ході виробничих випробувань зерноочисної машини ОВС-25 здійснювали очищення зернового вороху ячменю після збирання. Загальний обсяг переробленого зерна склав **83 т**, з яких **36 т** – із застосуванням стандартних підсівних решіт і **47 т** – із застосуванням удосконалених решіт із зигзагоподібним розташуванням отворів 2×25 мм.

Фактична продуктивність машини склала **18,6 т/год.**, що відповідає питомій продуктивності **939,4 кг/(дм·год.)**.

Повнота очищення зернового вороху від дрібних домішок при застосуванні стандартних підсівних решіт становила **66,3 %**, а при застосуванні удосконалених решіт із зигзагоподібним розташуванням отворів – **73,9 %**.

3. Висновки

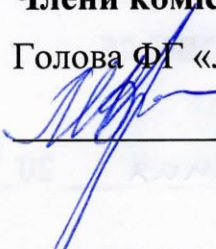
Приріст показника якості очищення склав **7,6 в. п.**, або **11,4 %** відносно стандартних решіт.

Удосконалені підсівні решета з зигзагоподібним розташуванням продовгуватих отворів 2×25 мм забезпечують підвищення повноти розділення зерна від дрібних домішок.

Акт складено в трьох примірниках.

Члени комісії:

Голова ФГ «ЛПК»


В. В. Левандовський

Доцент кафедри СГМ ЦНТУ


С.М. Лещенко

Доцент кафедри СГМ ЦНТУ


Р.В. Кісільов

Асистент кафедри СГМ ЦНТУ


І.М. Бажан



ЗАТВЕРДЖУЮ

Голова ФГ «Мельніченко»

Анатолій МЕЛЬНІЧЕНКО

«22» липня 2025 р.

АКТ

виробничих випробувань зерноочисної машини ЗВС-20А з удосконаленими підсівними решетами

с. Новомиколаївка, Кропивницький р-н.

«22» липня 2025 р.

Комісія у складі: представників кафедри сільськогосподарського машинобудування Центральноукраїнського національного технічного університету – доцента Лещенка Сергія Миколайовича, професора Васильковського Олексія Михайловича, асистента Бажана Ігоря Миколайовича, голови фермерського господарства ФГ «Мельніченко» Мельніченка Анатолія Вікторовича, провела розширені виробничі випробування зерноочисної машини ЗВС-20А з дослідними решетами, що мають зигзагоподібно розташовані продовгуваті отвори розміром 2×25 мм, та склала цей акт про наступне.

1. Умови проведення випробувань

Місце проведення: фермерське господарство с. Новомиколаївка, Кропивницького району, Кіровоградської області.

Культура: пшениця озима – післякомбайновий зерновий ворох пшениці.

Машина: ЗВС-20А у двох комплектаціях: зі стандартними підсівними решетами та з дослідними підсівними решетами з зигзагоподібним розташуванням отворів.

2. Результати випробувань

В ході проведення випробувань зерноочисної машини ЗВС-20А отримали наступні результати: питома продуктивність (по підсівним решетам) – близько 1250 кг/(дм·год.) – для стандартної комплектації і для дослідної, повнота виділення дрібних домішок при застосуванні стандартних підсівних решіт склала 54,7 %, а при застосуванні удосконалених решіт із зигзагоподібним розташуванням отворів – 68,2 %.

Аналіз складу очищеного зерна виявив: вміст домішок у очищеному зерні на стандартних решетах склав 4,4% (серед яких смітна домішка – 1,4%), на дослідних решетах – 3,1% (серед яких смітна домішка – 0,9%)

3. Висновки

Підвищення повноти виділення дрібних домішок за рахунок використання дослідних решіт склало 13,5 в.п., або 24,7% у порівнянні зі стандартними. Зменшився вміст домішок у очищеному зерні на 1,3 в.п., або 29,5%, причому вміст смітної домішки зменшився на 1,3 в.п., що складає 35,7% відносно базового рівня.

Використання підсвічних решіт з зигзагоподібним розташуванням продовгуватих отворів дозволяє підвищити якість очищення зерна і отримати зерно, що відповідає вимогам ДСТУ 3768:2019 для пшениці 1 класу.

Акт складено в двох примірниках.

Члени комісії:



Голова ФГ «Мельніченко»

МЕЛЬНИЧЕНКО

20__ р.

Доцент кафедри СГМ ЦНТУ

С.М. Лещенко

Професор кафедри СГМ ЦНТУ

О.М. Васильковський

Асистент кафедри СГМ ЦНТУ

І.М. Бажан

ЗАТВЕРДЖУЮ

Голова ФГ «Звездун О.М.»

Ярослав БІЖАН

"11" серпня 2025 р.



АКТ

виробничих випробувань зерноочисної машини ОВУ-25 з удосконаленими підсівними решетами

с. Мар'вка, Кропивницький р-н.

«11» серпня 2025 р.

Комісія у складі: представників кафедри сільськогосподарського машинобудування Центральноукраїнського національного технічного університету – доцента Лещенка Сергія Миколайовича, професора Васильковського Олексія Михайловича, асистента Бажана Ігоря Миколайовича, голови фермерського господарства «Звездун О.М.» Біжана Ярослава Васильовича, провела виробничі випробування очисника вороху ОВУ-25, оснащеної решетами з зигзагоподібно розташованими продовгуватими отворами розміром 2×25 мм, та склала цей акт про наступне.

1. Умови проведення випробувань

Місце проведення: фермерське господарство «Звездун О.М.», с. Мар'вка, Кропивницького району, Кіровоградської області.

Культура: пшениця озима – зерновий ворох вологістю 14,8%, засміченістю дрібними домішками 9,8%.

Машина: очисник вороху ОВУ-25.

Решета: ділильні – Ø4,5 мм, колосові Ø5,0 мм (стандартні); підсівні – 2×25 мм (стандартні); підсівні – 2×25 мм (дослідні) із зигзагоподібним розташуванням отворів 2×25 мм.

2. Результати випробувань

В ході проведення випробувань зерноочисної машини ОВУ-25 здійснювали очищення зернового вороху озимої пшениці після збирання. Загальний обсяг очищеного зерна склав 107,2 т, з яких 56,8 т – із застосуванням стандартних підсівних решіт і 50,4 т – із застосуванням дослідних. Продуктивність очисника вороху склала 24,2 т/год., що відповідає питомій продуктивності (по підсівних решетах) 1222,2 кг/(дм·год.).

Повнота очищення зернового вороху від дрібних домішок при застосуванні стандартних підсівних решіт становила 57,5 %, а при застосуванні удосконалених решіт із зигзагоподібним розташуванням отворів – 65,3 %.

3. Висновки


Підвищення повноти виділення дрібних домішок за рахунок встановлених дослідних решіт склало 7,8 відсоткові пункти, або 13,5 % відносно стандартних.

Таким чином, дослідні підсівні решета з зигзагоподібним розташуванням продовгуватих отворів 2×25 мм забезпечують отримання позитивного ефекту – підвищення повноти розділення зерна.

Акт складено в двох примірниках.

Члени комісії:


Голова ФГ «Звездун О.М.»


Я. В. Біжан

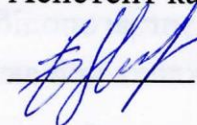
Доцент кафедри СГМ ЦНТУ


С.М. Лещенко

Професор кафедри СГМ ЦНТУ


О.М. Васильковський

Асистент кафедри СГМ ЦНТУ


І.М. Бажан

ЗАТВЕРЖУЮ

Проректор з наукової роботи
та міжнародних зв'язків ЦНТУ

Андрій ТИХИЙ

« 21 » січня

2025 р.

ЗАТВЕРЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної
Роботи ЦНТУ

Андрій КИРИЧЕНКО

« 21 » січня

2025 р.



А К Т

про використання результатів науково-дослідної роботи у навчальному процесі

Центральноукраїнського національного технічного університету

« 21 » січня 2025 р.

Результати дисертаційної роботи аспіранта, асистента кафедри сільськогосподарського машинобудування Бажана Ігоря Миколайовича на тему: «Обґрунтування параметрів плоского коливального решета», зокрема аналітичні матеріали щодо обґрунтування параметрів оригінального решета з зигзагоподібним розташуванням отворів використано у навчальному процесі кафедри сільськогосподарського машинобудування при підготовці фахівців на рівні бакалаврів і магістрів зі спеціальностей G11 «Машинобудування» і H7 «Агроінженерія».

Результати досліджень були використані при оновленні змісту лекційних матеріалів з дисциплін:

«Проектування машин і обладнання», «Теорія, конструкція і розрахунки сільськогосподарських машин», лектор: канд. техн. наук, професор Васильковський О.М.

Завідувач кафедри СГМ

Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ

« 21 » січня 2025 р.

В.о. начальника науково-дослідного сектору

Володимир СВЯЦЬКИЙ

« 21 » січня 2025 р.

Програма розрахунку прогнозованої ефективності впровадження вдосконаленого решета

Програму розроблено мовою JavaScript з використанням мови розмітки HTML та таблиць стилів CSS. Для побудови графіків використано бібліотеку Chart.js версії 4.4.1 (CDN: cdnjs.cloudflare.com). Програма є однофайловим веб-застосунком, що виконується у браузері без встановлення додаткового програмного забезпечення.

Системні вимоги – будь-який сучасний веб-браузер, наприклад Google Chrome, Edge, Safari або інш.; інтернет-з'єднання для завантаження бібліотеки Chart.js.

Лістинг програми розрахунку прогнозованої ефективності впровадження вдосконаленого решета

```
<!DOCTYPE html>
<html lang="uk">
<head>
<meta charset="UTF-8">
<meta name="viewport" content="width=device-width, initial-scale=1.0">
<title>Додаток Д – Програма прогнозованої ефективності вдосконаленого
решета</title>
<script
src="https://cdnjs.cloudflare.com/ajax/libs/Chart.js/4.4.1/chart.umd.js"></scrip
t>
<style>
/* ===== ЗМІННИ ТЕМИ ===== */
:root {
--bg-primary: #ffffff;
--bg-secondary: #f5f6f8;
--bg-tertiary: #ecef2;
--text-primary: #1a1d23;
--text-secondary: #5a5f6e;
--text-hint: #9098a8;
--border: rgba(0,0,0,0.10);
--border-em: rgba(0,0,0,0.20);
--accent: #1a56a0;
--accent-light: #e6f0fb;
--green: #2a7d3f;
--green-light: #eaf5ee;
--amber: #7a4f0a;
--amber-light: #fdf3e3;
--red: #922020;
--red-light: #fdeaea;
--radius-sm: 6px;
--radius-md: 10px;
--radius-lg: 14px;
--shadow-sm: 0 1px 4px rgba(0,0,0,0.07);
--shadow-md: 0 2px 10px rgba(0,0,0,0.09);
}
/* ===== СКИДАННЯ ТА БАЗОВІ СТИЛІ ===== */
*, *::before, *::after { box-sizing: border-box; margin: 0; padding: 0; }
```

```

body {
font-family: 'Segoe UI', 'Helvetica Neue', Arial, sans-serif;
background: var(--bg-secondary);
color: var(--text-primary);
font-size: 14px;
line-height: 1.6;
min-height: 100vh;
}

/* ===== ШАПКА ===== */
.app-header {
background: var(--accent);
color: #fff;
padding: 20px 32px 16px;
border-bottom: 3px solid #0e3d7a;
}
.app-header .subtitle {
font-size: 11px;
letter-spacing: 0.08em;
text-transform: uppercase;
opacity: 0.7;
margin-bottom: 4px;
}
.app-header h1 {
font-size: 18px;
font-weight: 600;
line-height: 1.3;
}
.app-header .meta {
margin-top: 6px;
font-size: 12px;
opacity: 0.65;
}

/* ===== НАВИГАЦІЯ (ВКЛАДКИ) ===== */
.tabs-nav {
background: var(--bg-primary);
border-bottom: 1px solid var(--border);
display: flex;
flex-wrap: wrap;
padding: 0 24px;
box-shadow: var(--shadow-sm);
}
.tab-btn {
padding: 12px 18px;
font-size: 13px;
font-weight: 500;
cursor: pointer;
border: none;
background: none;
color: var(--text-secondary);
border-bottom: 3px solid transparent;
transition: color 0.15s, border-color 0.15s;
white-space: nowrap;
}
.tab-btn:hover { color: var(--text-primary); }
.tab-btn.active { color: var(--accent); border-bottom-color: var(--accent); }

/* ===== ОСНОВНА ОБЛАСТЬ ===== */
.app-body { padding: 24px 32px; max-width: 1100px; margin: 0 auto; }

```

```

.section { display: none; }
.section.active { display: block; }

```

```

/* ===== СИТКА МЕТРИК ===== */
.metric-grid {
display: grid;
grid-template-columns: repeat(auto-fit, minmax(150px, 1fr));
gap: 12px;
margin-bottom: 20px;
}
.metric-card {
background: var(--bg-primary);
border: 1px solid var(--border);
border-radius: var(--radius-md);
padding: 14px 16px;
box-shadow: var(--shadow-sm);
}
.metric-card .m-label { font-size: 11px; color: var(--text-hint); text-
transform: uppercase; letter-spacing: 0.06em; margin-bottom: 4px; }
.metric-card .m-value { font-size: 26px; font-weight: 600; color: var(--text-
primary); line-height: 1.1; }
.metric-card .m-unit { font-size: 12px; color: var(--text-secondary); margin-
top: 2px; }
.metric-card .m-delta { font-size: 12px; font-weight: 600; margin-top: 4px; }
.delta-pos { color: var(--green); }
.delta-neg { color: var(--red); }

```

```

/* ===== КАРТКИ БМИКТУ ===== */
.card {
background: var(--bg-primary);
border: 1px solid var(--border);
border-radius: var(--radius-lg);
padding: 20px 22px;
margin-bottom: 16px;
box-shadow: var(--shadow-sm);
}
.card h3 {
font-size: 13px;
font-weight: 600;
color: var(--text-secondary);
text-transform: uppercase;
letter-spacing: 0.07em;
margin-bottom: 14px;
padding-bottom: 8px;
border-bottom: 1px solid var(--border);
}

```

```

/* ===== БЛОКИ ФОРМУЛ ===== */
.formula-box {
background: var(--bg-secondary);
border-left: 3px solid var(--accent);
border-radius: 0 var(--radius-sm) var(--radius-sm) 0;
padding: 10px 14px;
margin-bottom: 10px;
}
.formula-box .f-name { font-size: 12px; font-weight: 600; color: var(--text-
primary); margin-bottom: 4px; }
.formula-box .f-expr { font-family: 'Courier New', Courier, monospace; font-
size: 13px; color: var(--accent); margin-bottom: 4px; }
.formula-box .f-result { font-size: 12px; color: var(--text-secondary); }
.formula-box .f-result strong { color: var(--text-primary); }

```

```

/* ===== СЛАЙДЕРИ ===== */
.slider-group { margin-bottom: 12px; }
.slider-row { display: flex; align-items: center; gap: 10px; }
.slider-label { font-size: 13px; color: var(--text-secondary); min-width: 200px;
}
.slider-val { font-size: 13px; font-weight: 600; min-width: 90px; text-align:
right; color: var(--accent); }
input[type=range] {
flex: 1;
height: 4px;
accent-color: var(--accent);
cursor: pointer;
}
}
}
/* ===== ГРАФІКИ ===== */
.chart-wrap { position: relative; width: 100%; }
.legend {
display: flex;
flex-wrap: wrap;
gap: 14px;
margin-bottom: 10px;
font-size: 12px;
color: var(--text-secondary);
}
.legend span { display: flex; align-items: center; gap: 5px; }
.legend-dot { width: 10px; height: 10px; border-radius: 2px; flex-shrink: 0; }
}
}
/* ===== ПОРІВНЯЛЬНІ КАРТКИ ===== */
.compare-grid {
display: grid;
grid-template-columns: repeat(auto-fit, minmax(180px, 1fr));
gap: 12px;
margin-bottom: 16px;
}
.compare-card {
border: 1px solid var(--border);
border-radius: var(--radius-md);
padding: 14px;
background: var(--bg-primary);
}
.compare-card.highlight {
border: 2px solid var(--accent);
background: var(--accent-light);
}
.compare-card .cc-title { font-size: 13px; font-weight: 600; margin-bottom:
10px; color: var(--text-primary); line-height: 1.3; }
.compare-card .cc-row { display: flex; justify-content: space-between; font-
size: 12px; margin-bottom: 5px; gap: 6px; }
.compare-card .cc-key { color: var(--text-secondary); }
.compare-card .cc-val { font-weight: 600; text-align: right; }
.badge {
display: inline-block;
font-size: 10px;
font-weight: 700;
letter-spacing: 0.05em;
text-transform: uppercase;
padding: 2px 8px;
border-radius: 20px;
background: var(--accent);
color: #fff;
margin-bottom: 8px;
}
}
}

```

```


```

```

/* ===== РИЗИКИ ===== */
.risk-list { }
.risk-item {
display: flex;
gap: 12px;
align-items: flex-start;
padding: 12px 0;
border-bottom: 1px solid var(--border);
}
.risk-item:last-child { border-bottom: none; }
.risk-badge {
min-width: 56px;
height: 24px;
border-radius: 20px;
display: flex;
align-items: center;
justify-content: center;
font-size: 11px;
font-weight: 700;
flex-shrink: 0;
margin-top: 1px;
}
.risk-high { background: var(--red-light); color: var(--red); }
.risk-medium { background: var(--amber-light); color: var(--amber); }
.risk-low { background: var(--green-light); color: var(--green); }
.risk-text { font-size: 13px; color: var(--text-primary); line-height: 1.55; }
.risk-text strong { color: var(--text-primary); }

```

```

/* ===== ТАБЛИЦЯ РЕЗУЛЬТАТИВ ===== */
.result-table { width: 100%; border-collapse: collapse; font-size: 13px; }
.result-table td { padding: 7px 0; border-bottom: 1px solid var(--border); }
.result-table tr:last-child td { border-bottom: none; font-weight: 700; }
.result-table .r-key { color: var(--text-secondary); width: 65%; }
.result-table .r-val { text-align: right; font-weight: 600; color: var(--text-
primary); }

```

```

/* ===== ПІДВАЛ ===== */
.app-footer {
text-align: center;
padding: 18px 32px;
font-size: 11px;
color: var(--text-hint);
border-top: 1px solid var(--border);
margin-top: 10px;
}

```

```

/* ===== АДАПТИВНІСТЬ ===== */
@media (max-width: 640px) {
.app-body { padding: 16px; }
.app-header { padding: 14px 16px; }
.tabs-nav { padding: 0 8px; }
.tab-btn { padding: 10px 10px; font-size: 12px; }
.slider-label { min-width: 130px; font-size: 12px; }
}
</style>
</head>
<body>

```

```

<!-- ===== ШАПКА ДОДАТКУ ===== -->
<div class="app-header">
<div class="subtitle">Додаток Д · Дисертаційна робота</div>

```



```

<h3>Ключові формули ефективності сепарації</h3>
<div class="formula-box">
<div class="f-name">Ефективність сепарації (повнота розділення)</div>
<div class="f-expr"> $Y = (m_{\text{пр}} / m_{\text{заг}}) \times 100\%$ </div>
<div class="f-result">
де  $m_{\text{пр}}$  – маса часток підрешітної фракції, що пройшли крізь решето (кг);
 $m_{\text{заг}}$  – загальна маса підрешітної фракції у вихідному матеріалі (кг).<br>
<strong>Серійне ( $\beta = 0^\circ$ ):  $Y = 54,7\% \rightarrow$  Вдосконалене ( $\beta = 10^\circ$ ):  $Y = 68,2\%$ </strong>
</div>
</div>
<div class="formula-box">
<div class="f-name">Вміст домішок у очищеному зерні</div>
<div class="f-expr"> $C_d = (m_d / m_{\text{оч}}) \times 100\%$ </div>
<div class="f-result">
де  $m_d$  – маса домішок у очищеному зерні (кг);  $m_{\text{оч}}$  – загальна маса очищеного
зерна (кг).<br>
<strong>Серійне:  $4,4\% \rightarrow$  Вдосконалене:  $3,1\%$ </strong>
</div>
</div>
<div class="formula-box">
<div class="f-name">Відносний приріст ефективності сепарації</div>
<div class="f-expr"> $\Delta Y = (Y_{\beta 10} - Y_{\beta 0}) / Y_{\beta 0} \times 100\%$ </div>
<div class="f-result">
 $\Delta Y = (68,2 - 54,7) / 54,7 \times 100\% =$  <strong> $+24,7\%$ </strong>
</div>
</div>
<div class="formula-box">
<div class="f-name">Зниження вмісту домішок (відносне)</div>
<div class="f-expr"> $\Delta C = (C_{\text{сер}} - C_{\text{вдоск}}) / C_{\text{сер}} \times 100\%$ </div>
<div class="f-result">
Загальні домішки:  $\Delta C = (4,4 - 3,1) / 4,4 \times 100\% =$  <strong> $29,5\% \approx$ 
<strong> $30\%$ </strong><br>
Смітна домішка:  $\Delta C = (1,4 - 0,9) / 1,4 \times 100\% =$  <strong> $35,7\% \approx 35\%$ </strong><br>
Зернова домішка:  $\Delta C = (3,0 - 2,2) / 3,0 \times 100\% =$  <strong> $26,7\% \approx 27\%$ </strong>
</div>
</div>
</div>
<!-- Графік порівняння -->
<div class="card">
<h3>Порівняння показників очищення: серійне vs вдосконалене решето</h3>
<div class="legend">
<span><span class="legend-dot" style="background:#888;"></span>Серійне решето ( $\beta = 0^\circ$ )</span>
<span><span class="legend-dot" style="background:#1a56a0;"></span>Вдосконалене
решето ( $\beta = 10^\circ$ )</span>
</div>
<div class="chart-wrap" style="height:300px;">
<canvas id="techChart"
role="img"
aria-label="Порівняльна гістограма технологічних показників серійного та
вдосконаленого решета">
Серійне: сепарація  $54,7\%$ , домішки  $4,4\%$ , смітна  $1,4\%$ , зернова  $3,0\%$ .
Вдосконалене: сепарація  $68,2\%$ , домішки  $3,1\%$ , смітна  $0,9\%$ , зернова  $2,2\%$ .
</canvas>
</div>
</div>

```

```

</section>
<!-- ===== РОЗДІЛ 2: ЕКОНОМІЧНИЙ ЕФЕКТ ===== -->
<section id="sec-econ" class="section">
<div class="card">
<h3>Вхідні параметри фермерського господарства</h3>
<div class="slider-group">
<div class="slider-row">
<span class="slider-label">Площа посівів пшениці (га)</span>
<input type="range" min="50" max="1000" step="50" value="100" id="area"
oninput="calcEcon()">
<span class="slider-val" id="areaVal">100 га</span>
</div>
<div class="slider-row">
<span class="slider-label">Урожайність (т/га)</span>
<input type="range" min="2" max="8" step="0.5" value="5" id="yield"
oninput="calcEcon()">
<span class="slider-val" id="yieldVal">5,0 т/га</span>
</div>
<div class="slider-row">
<span class="slider-label">Цінова надбавка за 1 клас (грн/т)</span>
<input type="range" min="150" max="500" step="25" value="250" id="premium"
oninput="calcEcon()">
<span class="slider-val" id="premiumVal">250 грн/т</span>
</div>
<div class="slider-row">
<span class="slider-label">Частка зерна, що підвищує клас (%)</span>
<input type="range" min="50" max="100" step="5" value="90" id="upgrade"
oninput="calcEcon()">
<span class="slider-val" id="upgradeVal">90%</span>
</div>
</div>
</div>
</div>
<!-- Динамічні метрики -->
<div class="metric-grid" id="econMetrics"></div>
<!-- Формули + деталізація -->
<div class="card">
<h3>Формули та деталізований розрахунок річного економічного ефекту</h3>
<div id="econFormulas"></div>
<table class="result-table" id="econTable" style="margin-top:12px;"></table>
</div>
<!-- Графік залежності ефекту від площі -->
<div class="card">
<h3>Прогнозований економічний ефект залежно від площі посівів</h3>
<div class="legend">
<span><span class="legend-dot" style="background:#1a56a0;"></span>Надбавка за клас</span>
<span><span class="legend-dot" style="background:#2a7d3f;"></span>Загальний ефект</span>
</div>
<div class="chart-wrap" style="height:280px;">
<canvas id="econChart" role="img" aria-label="Лінійний графік економічного ефекту від площі посівів">
Загальний ефект лінійно зростає з площею посівів.
</canvas>
</div>
</div>

```

```

</section>
<!-- ===== РОЗДІЛ 3: ОКУПНІСТЬ ІНВЕСТИЦІЙ ===== -->
<section id="sec-invest" class="section">
<div class="card">
<h3>Вхідні параметри інвестиційного аналізу</h3>
<div class="slider-group">
<div class="slider-row">
<span class="slider-label">Капітальні витрати на впровадження (грн)</span>
<input type="range" min="10000" max="40000" step="1000" value="17500" id="capex"
oninput="calcInvest()">
<span class="slider-val" id="capexVal">17 500 грн</span>
</div>
<div class="slider-row">
<span class="slider-label">Прогнозований річний ефект (грн)</span>
<input type="range" min="50000" max="500000" step="5000" value="138000"
id="annEffect" oninput="calcInvest()">
<span class="slider-val" id="annEffectVal">138 000 грн</span>
</div>
<div class="slider-row">
<span class="slider-label">Термін служби решета (сезонів)</span>
<input type="range" min="1" max="7" step="1" value="4" id="life"
oninput="calcInvest()">
<span class="slider-val" id="lifeVal">4 сезони</span>
</div>
<div class="slider-row">
<span class="slider-label">Ставка дисконтування (%)</span>
<input type="range" min="5" max="30" step="1" value="15" id="disc"
oninput="calcInvest()">
<span class="slider-val" id="discVal">15%</span>
</div>
</div>
</div>
</div>
<!-- Динамічні метрики окупності -->
<div class="metric-grid" id="investMetrics"></div>
<!-- Формули інвестиційного аналізу -->
<div class="card">
<h3>Формули інвестиційного аналізу</h3>
<div class="formula-box">
<div class="f-name">Строк простої окупності (PP – Payback Period)</div>
<div class="f-expr">PP = I0 / CFпik</div>
<div class="f-result" id="ppResult"></div>
</div>
<div class="formula-box">
<div class="f-name">Чиста поточна вартість (NPV – Net Present Value)</div>
<div class="f-expr">NPV = Σ [CFt / (1 + r)t] - I0 , t = 1..T</div>
<div class="f-result" id="npvResult"></div>
</div>
<div class="formula-box">
<div class="f-name">Коефіцієнт ефективності капіталовкладень (ARR – Accounting
Rate of Return)</div>
<div class="f-expr">ARR = CFпik / I0</div>
<div class="f-result" id="arrResult"></div>
</div>
<div class="formula-box">
<div class="f-name">Рентабельність за строк служби (ROI – Return on
Investment)</div>
<div class="f-expr">ROI = (CFпik × T - I0) / I0 × 100%</div>
<div class="f-result" id="roiResult"></div>

```

```

</div>
</div>
<!-- Графік накопиченого грошового потоку -->
<div class="card">
<h3>Накопичений грошовий потік по сезонах (точка окупності)</h3>
<div class="chart-wrap" style="height:280px;">
<canvas id="investChart" role="img" aria-label="Лінійний графік накопиченого грошового потоку по сезонах, показує точку окупності">
Кумулятивний грошовий потік від початкових витрат до повної окупності.
</canvas>
</div>
</div>
</section>
<!-- ===== РОЗДІЛ 4: ПОРІВНЯННЯ РІШЕНЬ ===== -->
<section id="sec-compare" class="section">
<div class="card">
<h3>Характеристика альтернативних технічних рішень підвищення ефективності очищення</h3>
<div class="compare-grid" id="compareCards"></div>
</div>
<div class="card">
<h3>Діаграма «ефективність сепарації vs вартість впровадження»</h3>
<div class="legend">
<span><span class="legend-dot" style="background:#1a56a0;"></span>Зигзагоподібне решето (запропоноване рішення)</span>
<span><span class="legend-dot" style="background:#888;"></span>Альтернативні рішення</span>
</div>
<div class="chart-wrap" style="height:320px;">
<canvas id="compareChart" role="img" aria-label="Бульбашкова діаграма ефективності сепарації проти вартості впровадження для чотирьох технічних рішень">
Зигзагоподібне решето забезпечує найкраще співвідношення ефект/ціна.
</canvas>
</div>
</div>
</section>
<!-- ===== РОЗДІЛ 5: МАСШТАБ ВПРОВАДЖЕННЯ ===== -->
<section id="sec-scale" class="section">
<div class="card">
<h3>Параметри регіонального масштабування</h3>
<div class="slider-group">
<div class="slider-row">
<span class="slider-label">Кількість агрегатів у регіоні (одиниць)</span>
<input type="range" min="5" max="150" step="5" value="20" id="units" oninput="calcScale()">
<span class="slider-val" id="unitsVal">20 одиниць</span>
</div>
<div class="slider-row">
<span class="slider-label">Обсяг зерна на агрегат (т/рік)</span>
<input type="range" min="200" max="1500" step="50" value="600" id="grainUnit" oninput="calcScale()">
<span class="slider-val" id="grainUnitVal">600 т/рік</span>
</div>
</div>

```

```

<div class="slider-row">
<span class="slider-label">Ефект на 1 тонну зерна (грн/т)</span>
<input type="range" min="100" max="400" step="10" value="250" id="effPerTon"
oninput="calcScale()">
<span class="slider-val" id="effPerTonVal">250 грн/т</span>
</div>
</div>
</div>
</div>
<div class="metric-grid" id="scaleMetrics"></div>
<div class="card">
<h3>Сукупний регіональний ефект залежно від кількості охоплених агрегатів</h3>
<div class="chart-wrap" style="height:280px;">
<canvas id="scaleChart" role="img" aria-label="Стовпчаста діаграма регіонального
ефекту від кількості агрегатів">
Синім виділено поточний вибір кількості агрегатів.
</canvas>
</div>
</div>
</div>
</section>
<!-- ===== РОЗДІЛ 6: РИЗИКИ ===== -->
<section id="sec-risk" class="section">
<div class="card">
<h3>Аналіз ризиків та обмежень впровадження вдосконаленого решета</h3>
<div class="risk-list">
<div class="risk-item">
<div class="risk-badge risk-medium">Серед.</div>
<div class="risk-text">
<strong>Точність дотримання раціональних параметрів роботи.</strong>
Встановлені раціональні значення (питома подача 850-1050 кг/(дм·год), частота
коливань 440-490 кол/хв, кут  $\beta = 10^\circ$ ) є оптимальними для озимої пшениці та
зернових з аналогічними фізико-механічними властивостями. Застосування для інших
культур (кукурудза, соняшник, ріпак, соя) потребує додаткових досліджень та
коригування параметрів.
</div>
</div>
<div class="risk-item">
<div class="risk-badge risk-low">Низьк.</div>
<div class="risk-text">
<strong>Виробничі допуски при штампуванні решітного полотна.</strong>
Зигзагоподібне розміщення отворів є складнішим для штампування порівняно з
паралельним розміщенням, що може збільшити собівартість. Однак навіть дворазове
зростання вартості решета не змінює висновку про економічну привабливість: ARR
залишається не нижче 2,5-3,0.
</div>
</div>
<div class="risk-item">
<div class="risk-badge risk-medium">Серед.</div>
<div class="risk-text">
<strong>Консерватизм потенційних споживачів.</strong>
Аграрний сектор традиційно інертний щодо нових технічних рішень. Для подолання
цього бар'єру необхідне проведення демонстраційних виробничих випробувань у
господарствах – стандартна практика просування нових вузлів та агрегатів на
ринку.
</div>
</div>
<div class="risk-item">
<div class="risk-badge risk-low">Низьк.</div>

```

```
<div class="risk-text">
<strong>Коливання ринкової кон'юнктури.</strong>
Цінова надбавка за зерно 1-го класу відносно 2-го становить 200-400 грн/т
залежно від кон'юнктури зернового ринку. Навіть при мінімальній надбавці 200
грн/т прогнозований ефект залишається суттєвим і підтверджує доцільність
впровадження.
</div>
</div>
<div class="risk-item">
<div class="risk-badge risk-low">Низьк.</div>
<div class="risk-text">
<strong>Зношення решітного полотна в процесі експлуатації.</strong>
Нормативний термін служби 3-5 сезонів. Рекомендується контроль геометрії отворів
після кожного збирального сезону та своєчасна заміна полотна за появи ознак
надмірного зношення.
</div>
</div>
</div>
</div>
</div>
<div class="card">
<h3>Матриця ризиків: ймовірність × вплив на ефект від впровадження</h3>
<div class="chart-wrap" style="height:300px;">
<canvas id="riskChart" role="img" aria-label="Бульбашкова матриця ризиків за
ймовірністю та рівнем впливу на ефект від впровадження">
Більшість ризиків мають низьку ймовірність і незначний вплив.
</canvas>
</div>
</div>
</div>
</section>
</main>
</div>
<!-- ===== ПІДВАЛ ===== -->
<footer class="app-footer">
Програма розрахунку прогнозованої ефективності впровадження вдосконаленого
решета із зигзагоподібним розміщенням продовгуватих отворів |
Зерноочисна машина ЗВС-20А |  $\beta = 10^\circ$  | Патент України на корисну модель № 154304
|
JavaScript / HTML / CSS + Chart.js v4.4.1
</footer>
</div>
<!-- ===== JAVASCRIPT: УСЯ ЛОГІКА ПРОГРАМИ ===== -->
<script>
/* =====
ГЛОБАЛЬНІ ЗМІННІ: зберігають посилання на об'єкти Chart.js,
щоб знищувати їх перед повторною побудовою (уникнення дублювання)
===== */
const charts = {};
/**
* Знищує Chart.js-об'єкт за ідентифікатором canvas-елемента.
* @param {string} id - значення атрибута id canvas-елемента
*/
function destroyChart(id) {
if (charts[id]) {
charts[id].destroy();
delete charts[id];
}
}
}
</script>
```

```

/* =====
НАВІГАЦІЯ: перемикання між розділами програми
===== */
|
/**
* Відображає обраний розділ і приховує решту.
* Одночасно ініціалізує або перераховує вміст розділу.
* @param {string} name – ключ розділу
('tech'|'econ'|'invest'|'compare'|'scale'|'risk')
*/
function showTab(name) {
/* Зняти активний клас з усіх вкладок і розділів */
document.querySelectorAll('.tab-btn').forEach(b =>
b.classList.remove('active'));
document.querySelectorAll('.section').forEach(s =>
s.classList.remove('active'));
|
/* Активувати обрану вкладку і розділ */
document.querySelector(`[onclick="showTab('${name}')"]`).classList.add('active');
;
document.getElementById('sec-' + name).classList.add('active');
|
/* Ініціалізація вмісту розділу */
if (name === 'tech') initTechChart();
if (name === 'econ') calcEcon();
if (name === 'invest') calcInvest();
if (name === 'compare') initCompare();
if (name === 'scale') calcScale();
if (name === 'risk') initRisk();
}
|
/* =====
РОЗДІЛ 1: ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ЕФЕКТ
Порівняльна гістограма показників серійного та вдосконаленого решета
===== */
|
/**
* Буде порівняльну гістограму технологічних показників.
* Дані взяті з таблиці 5.1 дисертаційної роботи (розділ 5).
*/
function initTechChart() {
destroyChart('techChart');
const ctx = document.getElementById('techChart').getContext('2d');
charts['techChart'] = new Chart(ctx, {
type: 'bar',
data: {
labels: [
'Ефективність сепарації Y (%)',
'Загальні домішки (%)',
'Смітна домішка (%)',
'Зернова домішка (%)'
],
datasets: [
{
label: 'Серійне ( $\beta = 0^\circ$ )',
data: [54.7, 4.4, 1.4, 3.0],
backgroundColor: 'rgba(136,136,136,0.75)',
borderRadius: 4
},
{
label: 'Вдосконалене ( $\beta = 10^\circ$ )',
data: [68.2, 3.1, 0.9, 2.2],

```



```


```

```

/* Розрахункові величини */
const Q = area * yld; /* загальний обсяг зерна (т) */
const Q_up = Q * upgFrac; /* обсяг зерна, що підвищує клас (т) */
const E_klas = Math.round(Q_up * prem); /* надбавка за клас (грн) */
const E_clean = Math.round(Q * K_CLEAN); /* економія на доочищенні (грн) */
const E_elec = Math.round(Q * K_ELEC); /* економія електроенергії (грн) */
const E_total = E_klas + E_clean + E_elec; /* загальний ефект (грн) */
const effPerHa = Math.round(E_total / area); /* ефект на 1 га (грн/га) */

```

```


```

```

/* Оновити картки метрик */
document.getElementById('econMetrics').innerHTML = `
<div class="metric-card">
<div class="m-label">Загальний обсяг зерна</div>
<div class="m-value">${Q.toLocaleString('uk')}<span style="font-size:14px">
т</span></div>
<div class="m-unit">${area} га × ${yld.toFixed(1)} т/га</div>
</div>
<div class="metric-card">
<div class="m-label">Надбавка за клас</div>
<div class="m-value">${(E_klas/1000).toFixed(0)}<span style="font-size:14px">
тис. грн</span></div>
<div class="m-unit">на пік</div>
</div>
<div class="metric-card">
<div class="m-label">Загальний ефект</div>
<div class="m-value">${(E_total/1000).toFixed(0)}<span style="font-size:14px">
тис. грн</span></div>
<div class="m-unit">на пік</div>
</div>
<div class="metric-card">
<div class="m-label">Ефект на 1 га</div>
<div class="m-value">${effPerHa.toLocaleString('uk')}<span style="font-
size:14px"> грн</span></div>
<div class="m-unit">грн/га/пік</div>
</div>
`;

```

```


```

```

/* Оновити блоки формул */
document.getElementById('econFormulas').innerHTML = `
<div class="formula-box">
<div class="f-name">Надбавка за підвищення класності зерна з 2-го до 1-го</div>
<div class="f-expr">Е клас = S × У × d_уп × ΔЦ</div>
<div class="f-result">
= ${area} га × ${yld.toFixed(1)} т/га × ${Math.round(upgFrac*100)}% × ${prem}
грн/т
= <strong>${E_klas.toLocaleString('uk')} грн</strong>
</div>
</div>
<div class="formula-box">
<div class="f-name">Економія на доочищенні зерна (k = ${K_CLEAN} грн/т)</div>
<div class="f-expr">Е доочищ = Q_заг × ${K_CLEAN}</div>
<div class="f-result">
= ${Q.toLocaleString('uk')} т × ${K_CLEAN} грн/т
= <strong>${E_clean.toLocaleString('uk')} грн</strong>
</div>
</div>
<div class="formula-box">
<div class="f-name">Економія електроенергії (зниження витрат на ~15,9%; k =
${K_ELEC} грн/т)</div>
<div class="f-expr">Е ел = Q_заг × ${K_ELEC}</div>
<div class="f-result">

```

```

= ${Q.toLocaleString('uk')} т × ${K ELEC} грн/т
= <strong>${E elec.toLocaleString('uk')} грн</strong>
</div>
</div>
<div class="formula-box">
<div class="f-name">Загальний прогнозований річний економічний ефект</div>
<div class="f-expr">E зар = E_клас + E_доочищ + E_ел</div>
<div class="f-result">
= ${E_klas.toLocaleString('uk')} + ${E_clean.toLocaleString('uk')} +
${E elec.toLocaleString('uk')}
= <strong>${E total.toLocaleString('uk')} грн</strong>
</div>
</div>
`;
/* Зведена таблиця результатів */
document.getElementById('econTable').innerHTML = `
<tr><td class="r-key">Надбавка за підвищення класності</td><td class="r-
val">${E klas.toLocaleString('uk')} грн</td></tr>
<tr><td class="r-key">Економія на доочищенні</td><td class="r-
val">${E clean.toLocaleString('uk')} грн</td></tr>
<tr><td class="r-key">Економія електроенергії</td><td class="r-
val">${E elec.toLocaleString('uk')} грн</td></tr>
<tr><td class="r-key">Разом прогнозований річний ефект</td><td class="r-
val">${E total.toLocaleString('uk')} грн</td></tr>
`;
/* Побудова графіка залежності ефекту від площі */
const areas = [50, 100, 200, 300, 500, 700, 1000];
const premArr = areas.map(a => Math.round(a * yld * upgFrac * prem));
const totArr = areas.map(a => Math.round(a * yld * upgFrac * prem + a * yld *
K_CLEAN + a * yld * K_ELEC));
destroyChart('econChart');
const ctx = document.getElementById('econChart').getContext('2d');
charts['econChart'] = new Chart(ctx, {
type: 'line',
data: {
labels: areas.map(a => a + ' га'),
datasets: [
{
label: 'Надбавка за клас',
data: premArr,
borderColor: '#1a56a0',
backgroundColor: 'rgba(26,86,160,0.08)',
borderWidth: 2,
fill: true,
tension: 0.35,
pointRadius: 4
},
{
label: 'Загальний ефект',
data: totArr,
borderColor: '#2a7d3f',
backgroundColor: 'rgba(42,125,63,0.07)',
borderWidth: 2,
fill: true,
tension: 0.35,
borderDash: [6, 3],
pointRadius: 4
}
]
}
]

```



```

<div class="m-label">NPV за ${life} сезонів</div>
<div class="m-value">${Math.round(npv / 1000)}<span style="font-size:14px"> тис.
грн</span></div>
<div class="m-unit">r = ${Math.round(r * 100)}%</div>
</div>
<div class="metric-card">
<div class="m-label">Коеф. ефективності (ARR)</div>
<div class="m-value">${arr.toFixed(2)}<span style="font-
size:14px">*</span></div>
<div class="m-unit">річний ефект / витрати</div>
</div>
<div class="metric-card">
<div class="m-label">Рентабельність (ROI)</div>
<div class="m-value">${Math.round(roi)}<span style="font-
size:14px">%</span></div>
<div class="m-unit">за ${life} сезонів</div>
</div>
`;

```

```

/* Оновити результати формул */
document.getElementById('ppResult').innerHTML =
`PP = ${capex.toLocaleString('uk')} / ${ann.toLocaleString('uk')} =
<strong>${ppYears.toFixed(3)} сезону (${ppMonths} місяців збиральної
кампанії)</strong>`;

```

```

document.getElementById('npvResult').innerHTML =
`NPV = Σ [${ann.toLocaleString('uk')} / (1 + ${r * 100}.toFixed(0)}%)^t] -
${capex.toLocaleString('uk')} = <strong>${Math.round(npv).toLocaleString('uk')}
грн</strong>`;

```

```

document.getElementById('arrResult').innerHTML =
`ARR = ${ann.toLocaleString('uk')} / ${capex.toLocaleString('uk')} =
<strong>${arr.toFixed(3)} (${Math.round(arr * 100)}% на рік)</strong>`;

```

```

document.getElementById('roiResult').innerHTML =
`ROI = (${ann.toLocaleString('uk')} × ${life} - ${capex.toLocaleString('uk')}) /
${capex.toLocaleString('uk')} × 100% = <strong>${Math.round(roi)}%</strong>`;

```

```

/* Графік накопиченого грошового потоку */
const seasons = Array.from({ length: life + 1 }, ( , i) => i);
const cumCF = seasons.map(t => Math.round(-capex + ann * t));

```

```

destroyChart('investChart');
const ctx = document.getElementById('investChart').getContext('2d');
charts['investChart'] = new Chart(ctx, {
type: 'line',
data: {
labels: seasons.map(t => t === 0 ? 'Впроваджен.' : 'Сезон ' + t),
datasets: [{
label: 'Накопичений CF (грн)',
data: cumCF,
borderColor: '#1a56a0',
backgroundColor: cumCF.map(v => v >= 0 ? 'rgba(42,125,63,0.10)' :
'rgba(146,32,32,0.08)'),
borderWidth: 2.5,
fill: true,
tension: 0.25,
pointRadius: 6,
pointBackgroundColor: cumCF.map(v => v >= 0 ? '#2a7d3f' : '#922020')
}]
},
options: {

```

```
responsive: true,  
maintainAspectRatio: false,  
plugins: { legend: { display: false } },  
scales: {  
  y: {  
    title: { display: true, text: 'тис. грн' },  
    ticks: { callback: v => Math.round(v / 1000) + 'k' }  
  }  
}  
});
```

```
/* =====  
РОЗДІЛ 4: ПОРІВНЯННЯ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ  
Дані з таблиці 5.4 дисертаційної роботи  
===== */
```

```
/**  
* Масив об'єктів із характеристиками порівнюваних технічних рішень.  
*/
```

```
const SOLUTIONS = [  
  {  
    name: 'Зигзагоподібне решето ( $\beta = 10^\circ$ )',  
    highlight: true,  
    badge: 'Запропоноване рішення',  
    eff: '+24,7%', effVal: 24.7,  
    cost: '35-45 тис. грн', costVal: 40,  
    change: 'Не потрібна',  
    energy: '-15,9%',  
    payback: '< 1 місяця'  
  },  
  {  
    name: 'Гумово-полімерне (струнне) решето',  
    highlight: false,  
    eff: '+8-12%', effVal: 10,  
    cost: '80-150 тис. грн', costVal: 115,  
    change: 'Не потрібна',  
    energy: '0%',  
    payback: '3-6 місяців'  
  },  
  {  
    name: 'Ультразвуковий збудник решета',  
    highlight: false,  
    eff: '+10-15%', effVal: 12.5,  
    cost: '150-300 тис. грн', costVal: 225,  
    change: 'Монтаж блока',  
    energy: '+5-15%',  
    payback: '6-12 місяців'  
  },  
  {  
    name: 'Новий агрегат із 2 ступенями очищення',  
    highlight: false,  
    eff: '+35-50%', effVal: 42.5,  
    cost: '500-2000 тис. грн', costVal: 1250,  
    change: 'Новий агрегат',  
    energy: '+30-60%',  
    payback: '3-7 років'  
  }  
];
```

```
/**
```



```

/* =====
РОЗДІЛ 5: МАСШТАБ ВПРОВАДЖЕННЯ
Формула регіонального ефекту:

$$E_{reg} = N \times Q_{agr} \times e_t$$

де:
N – кількість агрегатів (одиниць)
 $Q_{agr}$  – обсяг зерна на агрегат (т/рік)
 $e_t$  – ефект на 1 тону зерна (грн/т)
===== */
/**
 * Перераховує регіональний ефект при зміні слайдерів.
 */
function calcScale() {
const N = +document.getElementById('units').value;
const Q_agr = +document.getElementById('grainUnit').value;
const e_t = +document.getElementById('effPerTon').value;

document.getElementById('unitsVal').textContent = N + ' одиниць';
document.getElementById('grainUnitVal').textContent = Q_agr + ' т/рік';
document.getElementById('effPerTonVal').textContent = e_t + ' грн/т';

const E_reg = Math.round(N * Q_agr * e_t); /* сукупний регіональний ефект (грн) */
const Q_reg = N * Q_agr; /* загальний обсяг зерна (т/рік) */
const effPerUnit = Math.round(Q_agr * e_t); /* ефект на один агрегат (грн/рік) */

document.getElementById('scaleMetrics').innerHTML = `
<div class="metric-card">
<div class="m-label">Агрегатів охоплено</div>
<div class="m-value">${N}</div>
<div class="m-unit">одиниць зерноочисної техніки</div>
</div>
<div class="metric-card">
<div class="m-label">Зерно оброблено по регіону</div>
<div class="m-value">${(Q_reg / 1000).toFixed(1)}<span style="font-size:14px">
тис. т</span></div>
<div class="m-unit">на рік</div>
</div>
<div class="metric-card">
<div class="m-label">Ефект на 1 агрегат</div>
<div class="m-value">${(effPerUnit / 1000).toFixed(0)}<span style="font-
size:14px"> тис. грн</span></div>
<div class="m-unit">на рік</div>
</div>
<div class="metric-card">
<div class="m-label">Сукупний регіональний ефект</div>
<div class="m-value">${(E_reg / 1000000).toFixed(2)}<span style="font-
size:14px"> млн грн</span></div>
<div class="m-unit">на рік</div>
</div>
`;

/* Стовпчаста діаграма */
const unitArr = [5, 10, 15, 20, 30, 50, 75, 100, 150];
destroyChart('scaleChart');
const ctx = document.getElementById('scaleChart').getContext('2d');
charts['scaleChart'] = new Chart(ctx, {
type: 'bar',
data: {
labels: unitArr.map(u => u + ' агр.'),

```

```

datasets: [{
  label: 'Регіональний ефект (млн грн/рік)',
  data: unitArr.map(u => +(u * Q agr * e t / 1 000 000).toFixed(3)),
  backgroundColor: unitArr.map(u =>
u <= N ? 'rgba(26,86,160,0.80)' : 'rgba(26,86,160,0.18)'
),
  borderRadius: 4
}]
},
options: {
  responsive: true,
  maintainAspectRatio: false,
  plugins: {
  legend: { display: false },
  tooltip: { callbacks: { label: c => ` ${c.parsed.y.toFixed(2)} млн грн/рік` } }
},
  scales: {
  y: { title: { display: true, text: 'млн грн/рік' } }
}
}
});
}
}
/* =====
РОЗДІЛ 6: РИЗИКИ
Матриця ризиків: ймовірність × вплив
===== */
/**
* Будує бульбашкову матрицю ризиків.
* Розміри бульбашок пропорційні добутку (ймовірність × вплив).
*/
function initRisk() {
const risks = [
{ label: 'Точність параметрів роботи', prob: 3.0, impact: 3.0, r: 14, color:
'rgba(186,117,23,0.75)' },
{ label: 'Допуски штампування', prob: 2.0, impact: 2.0, r: 10, color:
'rgba(42,125,63,0.70)' },
{ label: 'Консерватизм споживачів', prob: 4.0, impact: 2.0, r: 12, color:
'rgba(186,117,23,0.75)' },
{ label: 'Коливання ринкової кон'юнктури', prob: 3.0, impact: 1.5, r: 9, color:
'rgba(42,125,63,0.70)' },
{ label: 'Зношення решітного полотна', prob: 2.0, impact: 1.0, r: 8, color:
'rgba(42,125,63,0.70)' }
];
destroyChart('riskChart');
const ctx = document.getElementById('riskChart').getContext('2d');
charts['riskChart'] = new Chart(ctx, {
  type: 'bubble',
  data: {
  datasets: risks.map(rk => ({
  label: rk.label,
  data: [{ x: rk.prob, y: rk.impact, r: rk.r }],
  backgroundColor: rk.color
}))
},
  options: {
  responsive: true,
  maintainAspectRatio: false,
  plugins: {
  legend: { position: 'bottom', labels: { font: { size: 12 }, boxWidth: 12 } }
}
}
}

```

```
},
scales: {
x: {
min: 0, max: 6,
title: { display: true, text: 'Ймовірність (1 = низька → 5 = висока)' }
},
y: {
min: 0, max: 5,
title: { display: true, text: 'Вплив на ефект (1 = незначний → 5 = критичний)' }
}
}
});
}
}
/* =====
ІНІЦІАЛІЗАЦІЯ: завантаження першого розділу при відкритті файлу
===== */
initTechChart();
</script>
</body>
</html>
}
```

Копії сертифікатів учасника наукових заходів, на яких обговорювалися
результати досліджень



CERTIFICATE

is awarded to

Bazhan Ihor

for being an active participant in
IX International Scientific and Practical Conference

**“MODERN SCIENCE: TRENDS,
CHALLENGES, SOLUTIONS”**

24 Hours of Participation

(0,8 ECTS credits)



LIVERPOOL

9-11 April 2026

sci-conf.com.ua