

Центральноукраїнський національний технічний університет

Агротехнічний факультет

Кафедра сільськогосподарського машинобудування

“Допущено до захисту”

Зав. кафедрою СГМ

к.т.н., професор

_____ Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ

« ____ » _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**за другим (магістерським) рівнем вищої освіти
на тему:**

«Вдосконалення конструкції та дослідження параметрів зерноочисної
машини МПО-50»

Виконав здобувач вищої освіти II курсу,
групи ГМ-24М-1

ОНП «Галузеве машинобудування»
спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування»

_____ Теличенко Вадим Васильович
« ____ » _____ 2026 р.

Керівник роботи

доцент, канд. техн. наук

_____ Сергій ЛЕЩЕНКО

« ____ » _____ 2026 р.

Рецензент

доцент, канд. техн. наук

_____ Кирил ЩЕРБИНА

« ____ » _____ 2026 р.

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет
Факультет Агротехнічний
Кафедра Сільськогосподарського машинобудування
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Галузь знань G «Інженерія, виробництво та будівництво»
Спеціальність G11 Машинобудування (за спеціалізаціями)»
Спеціалізація G11.03 «Технологічні машини та обладнання»
Освітньо-наукова програма «Галузеве машинобудування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ

«___» _____ 2026 року

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ДРУГИМ (МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

_____ Теличенка Вадима Васильовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проекту) Вдосконалення конструкції та дослідження параметрів зерноочисної машини МПО-50
2. Керівник роботи (проекту) Лещенко Сергій Миколайович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
3. Строк подання роботи до захисту 16.05.2026 р.
4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи (проекту) _____

5. Перелік ілюстративного матеріалу _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка

Дата видачі завдання

«___» _____ 2026 р.

Підпис керівника

_____ (прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2026 р.

Підпис здобувача _____

(прізвище та ініціали)

Анотація

Тема: «Вдосконалення конструкції та дослідження параметрів зерноочисної машини МПО-50»

зерноочисна машина, сітчастий транспортер, розподільник зернової маси, щітковий механізм очищення, напрямні пластини, ефективність сепарації, втрати зерна

У магістерській роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання підвищення ефективності попереднього очищення зернового вороху шляхом удосконалення конструкції та обґрунтування раціональних параметрів зерноочисної машини МПО-50. Проведено аналіз існуючих технічних рішень у галузі післязбиральної обробки зерна та встановлено основні недоліки базової конструкції машини, серед яких нерівномірний розподіл зернової маси по ширині сітчастого транспортера, забивання отворів полотна при роботі з вологим зерном і нестабільність аеродинамічного режиму пневмосепаруючого каналу.

На основі теоретичних досліджень обґрунтовано вдосконалення основних робочих органів МПО-50. Запропоновано нову конструкцію розподільника зернової маси, визначено раціональні параметри щіткового механізму очищення сітчастого транспортера та встановлено доцільність використання профільованих напрямних пластин у пневмосепаруючому каналі. Результати експериментальних досліджень підтвердили, що модернізована машина забезпечує більш рівномірне завантаження робочої поверхні, підвищує ефективність сепарації та зменшує втрати повноцінного зерна з відходами.

Дослідження показали, що вдосконалена зерноочисна машина МПО-50 забезпечує стабільні показники очищення зерна за різних початкових умов вороху, зокрема при підвищеній вологості та засміченості матеріалу. Практична реалізація запропонованих технічних рішень дає змогу підвищити якість післязбиральної обробки зерна, покращити умови експлуатації машини та збільшити техніко-економічну ефективність її використання у зерноочисних комплексах господарств.

Abstract

Topic: «Improvement of the Design and Investigation of Parameters of the MPO-50 Grain Cleaning Machine»

grain cleaning machine, screen conveyor, grain distributor, brush cleaning mechanism, guide plates, separation efficiency, grain losses

The master's thesis addresses an urgent applied problem of improving the efficiency of preliminary grain cleaning by improving the design and substantiating rational parameters of the MPO-50 grain cleaning machine. The study analyzes existing technical solutions in post-harvest grain processing and identifies the main shortcomings of the base design, including non-uniform distribution of grain material across the width of the screen conveyor, clogging of screen openings when processing wet grain, and instability of the aerodynamic regime in the pneumatic separation channel.

Based on theoretical research, the main working units of the MPO-50 were improved. A new grain distributor design was proposed, rational parameters of the brush cleaning mechanism for the screen conveyor were determined, and the feasibility of using profiled guiding plates in the pneumatic separation channel was established. Experimental results confirmed that the modernized machine provides more uniform loading of the working surface, increases separation efficiency, and reduces losses of full-value grain in the waste fraction.

The research showed that the improved MPO-50 grain cleaning machine ensures stable cleaning performance under different initial conditions of the grain mixture, including increased moisture and impurity content. Practical implementation of the proposed technical solutions makes it possible to improve post-harvest grain cleaning quality, enhance operating conditions, and increase the technical and economic efficiency of the machine in grain-cleaning complexes.

Зміст

1. Вступ.....	5
2. Стан досліджуваного питання та вибір напрямку досліджень.....	7
3. Наукова частина	35
4. Практична реалізація результатів досліджень	53
5. Охорона праці	59
6. Загальні висновки.....	64
Список використаної літератури	66
Додатки	70

1. ВСТУП

Виробництво зерна в Україні є стратегічно важливим завданням продовольчої безпеки і є однією із головних місій агропромислового комплексу Держави. За даними Державної служби статистики, в останні роки обсяги збирання зернових та зернобобових культур є стабільними і складають близько 60–80 млн тонн на рік. Слід наголосити, що значна частина вирощеного і зібраного зерна потребує якісної післязбиральної обробки в частині очищення та підготовки збіжжя до зберігання. Ефективність роботи зерноочисних машин і ліній безпосередньо визначає збереженість всього урожаю, якість насіннєвого матеріалу та кінцеву собівартість зерна як товарного продукту.

Серед зерноочисних машин, що використовуються у господарствах України, провідне місце займає зерноочисна машина попереднього очищення МПО-50. Ця машина стаціонарного типу з сітчастим транспортером забезпечує продуктивність 50 т/год і традиційно входить до складу зерноочисно-сушильних комплексів типу КЗС та зерноочисних агрегатів ЗАВ. Широке поширення МПО-50 в аграрному секторі зумовлено доступною ціною, простотою конструкції та налагодженою системою технічного обслуговування.

Водночас практичний досвід експлуатації та результати аналізу науково-технічної літератури свідчать про наявність суттєвих конструктивних недоліків базового зерноочисного агрегату. Зокрема, нерівномірний розподіл зернового матеріалу по ширині сітчастого транспортера (коефіцієнт варіації до 22%) знижує ефективність сепарації. Відсутність механізму самоочищення сітки спричиняє значному зменшенню її живого перерізу, насамперед при роботі з вологим зерном, а нестабільний аеродинамічний режим вертикального пневматичного каналу забезпечує зростання втрат повноцінного зерна у фракцією відходів. В своїй сукупності зазначені недоліки призводять до суттєвого зниження ефективності очищення до 72–83% та перевищення нормативного рівня втрат повноцінного зерна у відходи.

Усунення виявлених недоліків шляхом вдосконалення конструкції МПО-50 без суттєвої зміни конструкції і принципів очищення є актуальним науково-

практичним завданням, що безпосередньо впливає на ефективність використання зернового потенціалу агропідприємств.

Метою даної магістерської роботи є підвищення ефективності попереднього очищення зерна шляхом вдосконалення конструкції зерноочисної машини МПО-50 та обґрунтування її раціональних технологічних параметрів.

Для досягнення поставленої мети визначено наступні задачі досліджень:

- проаналізувати сучасний стан технічного забезпечення операцій післязбирального очищення зерна та виявити недоліки базової конструкції МПО-50;
- теоретично обґрунтувати параметри вдосконаленого розподільника зернової маси, механізму самоочищення сітчастого транспортера та профільованих напрямних пластин пневмосепаруючого каналу;
- експериментально підтвердити ефективність запропонованих конструктивних рішень та визначити раціональні режимні параметри роботи вдосконаленої зерноочисної машини;
- надати рекомендації щодо практичного впровадження розроблених вдосконалень.

Об'єктом дослідження є технологічний процес попереднього очищення зернового вороху в стаціонарній зерноочисній машині МПО-50.

Предметом дослідження є конструктивні параметри розподільника зернової маси, механізму очищення сітчастого транспортера та пневмосепаруючого каналу зерноочисної машини МПО-50.

Практичне значення роботи полягає в тому, що розроблені конструктивні рішення та визначені раціональні параметри роботи зерноочисного агрегату можуть бути використані підприємствами-виробниками при модернізації серійних зерноочисних машин МПО-50, а також при проектуванні зерноочисного обладнання аналогічного принципу дії наступного покоління.

2. СТАН ДОСЛІДЖУВАНОВОГО ПИТАННЯ ТА ВИБІР НАПРЯМУ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Аналіз технічного забезпечення операцій після збирального очищення врожаю

Після збирання зернових культур зерновий ворох містить значну кількість різноманітних домішок: збоїну, насіння бур'янів, половинки та щуплі зернини, пил, частинки піску а також більш крупні включення (частинки ґрунту, камінці, залишки стебел основної культури та інших рослин тощо). За статистикою, частка домішок у зерновому вороху після прямого комбайнування коливається в межах від 5 до 20% залежно від культури, строків збирання, технічного стану збирального агрегату та погодних умов [1]. Вимоги до якості товарного зерна, встановлені ДСТУ 3768:2019 для пшениці, передбачають сумарний вміст домішок не більше 2%, з яких зернова домішка – не більше 5%, смітна – не більше 2%. Насіннєве зерно підпадає під значно жорсткіші вимоги відповідно до ДСТУ 2240:1993.

Операції попереднього та первинного очищення зерна є обов'язковими технологічними етапами будь-якого зернозберігального комплексу. Попереднє очищення передбачає видалення грубих домішок (зелених частин рослин, крупного сміття, стебел) з метою підготовки зернового вороху до сушіння та подальшого оброблення. Первинне очищення забезпечує доведення зернового матеріалу до кондицій товарного зерна. Вторинне (або насіннєве) очищення здійснюється при підготовці насіннєвого матеріалу і потребує застосування спеціалізованого обладнання – трієрів, пневматичних столів, фотосепараторів тощо [2].

Технологічний процес очищення зерна від домішок базується на розбіжностях у фізико-механічних та аеродинамічних властивостях зерна основної культури і домішок. Ключовими ознаками, що використовуються для сепарації, є: геометричні розміри (довжина, ширина, товщина); аеродинамічні характеристики (критична швидкість витання у повітряному потоці); питома маса та форма частинки; стан поверхні зернини. На підставі зазначених ознак

розроблені різні типи робочих органів зерноочисних машин: плоскі та циліндричні решета з різними формами та розмірами отворів, вертикальні та горизонтальні пневматичні канали, пневматичні сортувальні столи, трієрні циліндри, фотосепаратори тощо [3].

Слід зазначити, що ефективність функціонування зерноочисного обладнання в умовах сучасних агропідприємств України є критичним фактором ефективності виробництва продукції рослинництва. Дослідженнями встановлено, що механічні втрати зерна при неналежному функціонуванні зерноочисних ліній досягають 1,5–3,5% від маси вороху, що при обсягах збирання 2000–5000 т на рік забезпечує значні економічні збитки [4]. Тому правильний вибір зерноочисного обладнання та підтримання його у справному технічному стані є важливим завданням для аграрних підприємств.

2.1.1. Класифікація зерноочисних машин та короткий огляд серійних конструкцій

Зерноочисні машини класифікують за декількома ознаками: призначенням (попереднє, первинне, вторинне очищення); мобільністю (стаціонарні, самохідні, причіпні); типом основних робочих органів (решітні, пневматичні, комбіновані – пневморешітні); продуктивністю; типом коливань решітного стану (прямолінійні, кругові, еліптичні) тощо [1, 3].

Найпоширенішою у господарствах України є повітряно-решітна схема очищення зернових сумішей, що поєднує решітний сепаратор із пневмосепаруючими каналами. Машини такого типу забезпечують видалення домішок як за геометричними розмірами (за шириною або товщиною), так і за аеродинамічними властивостями. Відповідно до призначення та продуктивності серійних машин можна виділити такі основні групи [1, 2]:

- скальператори (попереднє очищення) продуктивністю 50–200 т/год – призначені для швидкого виділення великих домішок при прийманні зерна безпосередньо від зернозбирального комбайна;

- машини первинного очищення продуктивністю 20–60 т/год – забезпечують доведення зерна до кондицій товарного зерна або його підготовку до сушіння;
- машини вторинного (насіннєвого) очищення продуктивністю 3–15 т/год – для підготовки насіннєвого матеріалу з нормативними вимогами щодо чистоти $\geq 99\%$.

Нижче розглянуті основні зерноочисні машини, що набули поширення у фермерських господарствах та окремих підприємствах зернопереробної галузі України.

Зерноочисна машина МПО-50 (машина попереднього очищення, продуктивність 50 т/год) (рис. 1). Докладний конструктивний опис машини наведено у підрозділі 2.1.3. МПО-50 є базовою машиною попереднього очищення у складі зерноочисно-сушильних комплексів типу КЗС та ЗАВ, що найчастіше зустрічаються в нашій державі. Технологічний принцип роботи засновано на поєднанні функціонування сітчастого транспортера (для виділення крупних домішок) та пневматичного каналу (для виділення аеродинамічно легких домішок).



Рис. 1. Загальний вигляд зерноочисної машини МПО-50

Зерноочисна машина ЗВС-20А (рис. 2) (продуктивністю до 20 т/год при первинному очищенні). Стационарна пневморешітна машина, яка призначена для первинного і вторинного очищення зерна. Конструктивно включає два решітних стани по два решета в кожному (решета Б1, Б2 – верхній стан; В, Г – нижній стан), відцентровий вентилятор і горизонтальний пневмосепаруючий канал. Машина добре зарекомендувала себе для роботи у складі комплексів ЗАВ-20 та ЗАВ-40 [5].

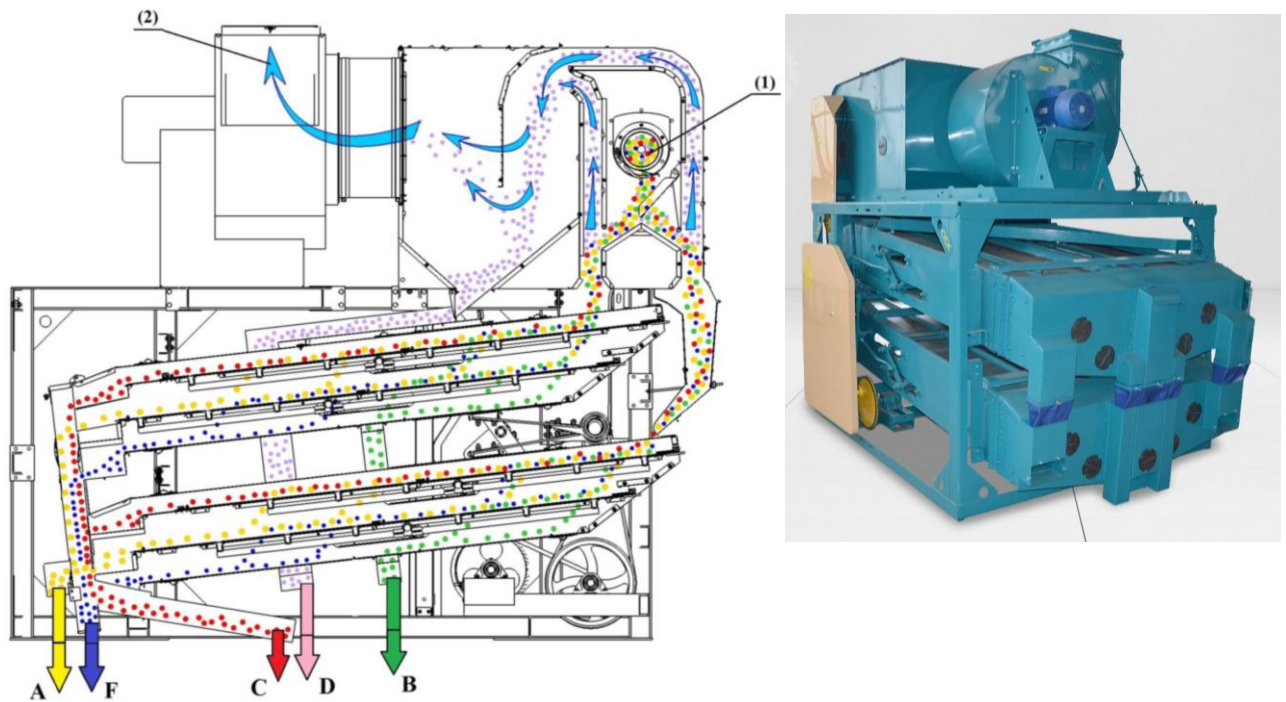


Рис. 2. Технологічна схема роботи та загальний вигляд зерноочисної машини ЗВС-20А:

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 (2-й сорт)

Перевагами ЗВС-20А є простота конструкції; можливість роботи у трьох режимах (попереднє, первинне очищення, калібрування); невисока вартість і поширена мережа сервісного обслуговування.

Основними недоліками зерноочисної машини ЗВС-20А є відносно низька продуктивність (до 20 т/год) для великих господарств; відсутність механізму самоочищення решіт; нестабільна робота при вологості зерна $> 17\%$; підвищений

рівень шуму (до 88 дБ); значна металоємність; відсутність автоматичного регулювання режимів.

Зерноочисна машина ОВС-25 та ОВС-25С (рис. 3) (продуктивністю до 25 т/год) є одним із найпоширеніших агрегатів на токах дрібних і середніх фермерів. Зазначена зерноочисна машина є стаціонарною пневморешітною машиною, яка призначена для первинного очищення зерна. Конструктивно машини типу ОВС подібні до ЗВС-20А, але мають більшу площу решіт і підвищену продуктивність. Модифікація ОВС-25С оснащена удосконаленою системою аспірації.

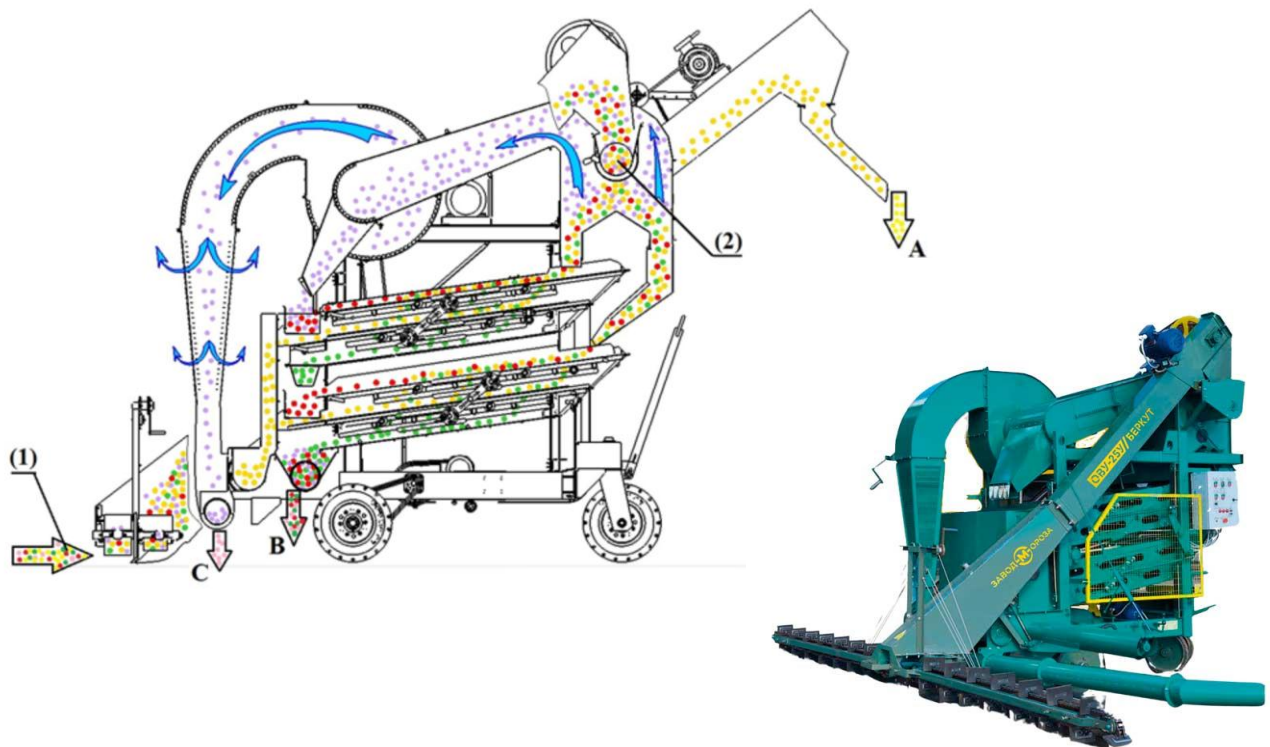


Рис. 3. Технологічна схема роботи та загальний вигляд зерноочисної машини ОВС-25:

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

Перевагами зерноочисних машин типу ОВС є підвищена порівняно з ЗВС-20А продуктивність; можливість роботи в одній лінії з МПО-50.

Основні недоліки є аналогічними із агрегатом ЗВС-20А, крім цього відмічається низька ефективність очищення зерноочисними машинами ОВС дрібнонасінневих культур (просо, льон, рапс).

Зерноочисна машина ІСМ-50 (ISM Separator, Україна, продуктивність 50 т/год) (рис. 4). Барабанний (роторний) сепаратор, що використовує циліндричні обертові решета. Принципово відрізняється від площинних решітних машин відсутністю ексцентрикового приводу та відповідного рівня вібрацій. Ефективність очищення зерна пшениці досягає 98–99% при більш низькій питомій металоємності [6].



Рис. 4. Загальний вигляд зерноочисної машини ІСМ-50

Переваги зерноочисного агрегату ІСМ-50 є висока ефективність очищення; низький рівень вібрацій і шуму; компактність; рівномірне навантаження на решітну поверхню; можливість роботи без балансування.

Недоліки машини ІСМ-50 – вища вартість порівняно з традиційними машинами із плоскими коливальними решетами; необхідність підтримання точних зазорів між ротором і корпусом; складніший ремонт у польових умовах.

Серед провідних зарубіжних виробників зерноочисного обладнання в Україні представлені компанії Cimbria (Данія), PETKUS Technologie GmbH (Німеччина), Westrup A/S (Данія), Bühler AG (Швейцарія) та Akyurek Technology (Туреччина) [7].

Cimbria Delta Super Series (Данія) (рис. 5). Лінійка прецизійних зерноочисних машин від компанії AGCO Corporation/Cimbria призначена для первинного та вторинного очищення всіх видів зерна та насіння. Машини серії Delta Super комплектуються: точними живильниками з рівномірним розподілом матеріалу по ширині решета; системою попередньої та після решітної аспірації з пневматичним підйомом; HMI-системою керування на базі Siemens PLC з 9-дюймовою сенсорною панеллю; механізмом самоочищення решіт гумовими кульками (Ball Box system) [8].



Рис. 5. Загальний вигляд зерноочисного агрегату Delta Super Series CIMBRIA (Данія)

Машини Delta Super 101/102/104 забезпечують загальну ефективність очищення зернових $\geq 98,5\%$, коефіцієнт варіації рівномірності розподілу $CV \leq 5\%$, втрати зерна з відходами $\leq 0,1\%$. Серед головних недоліків даних зерноочисних машин – висока вартість (від 30 000 до 80 000 EUR залежно від комплектації); необхідність використання під час роботи кваліфікованого персоналу; складність ремонту в польових умовах та проблеми із поставкою запасних частин.

PETKUS K-Series (Германія) (рис. 6). Компанія PETKUS Technologie GmbH пропонує модельний ряд зерноочисних машин K-Cleaner різної

продуктивності. Машини К-серії призначені для очищення всіх видів зернових, зернобобових та олійних культур. Особливостями конструкції є модульна компоновка, що дозволяє нарощувати продуктивність в залежності від культури та виду очищення, можливість оснащення трієрним блоком, широкий вибір агрегатів за продуктивністю (від 2 до 100 т/год). К-Cleaner забезпечує ефективність відділення смітних домішок $\geq 95\text{--}98\%$ [9].



Рис. 6. Загальний вигляд зерноочисного агрегату K-Series виробника PETKUS (Германія)

Основними перевагами зерноочисних агрегатів PETKUS (Германія) є гнучкість конфігурацій серійних агрегатів, висока надійність під час роботи на зерні та насінні різних культур та широка сервісна мережа у всіх країнах Європи, в тому числі і в Україні. Серед головних недоліків виділяються надто висока ціна; обмежена локалізація запасних частин у нашій державі.

Компанія Westrup A/S (Данія) (рис. 7) спеціалізується на зерноочисному обладнанні для насіннєвих господарств. Лінійка LA/LB призначена для тонкого (насіннєвого) очищення. Машини оснащені системою ламінарного повітряного потоку з кількома регульованими зонами аспірації, що забезпечує особливо якісне розділення насіння за аеродинамічними властивостями. Продуктивність – від 2 до 25 т/год. Ефективність очищення насіннєвого матеріалу – $\geq 99\%$.

Концерн Bühler AG (Швейцарія) є світовим лідером у технологіях переробки зерна. Для попереднього та первинного очищення Bühler пропонує машини серії MNRA та MTRB (рис. 8), що відрізняються надвисокою продуктивністю (до 200 т/год), автоматизованим управлінням та можливістю інтеграції у цифрові системи контролю якості зерна. Вартість обладнання Bühler є найвищою серед конкурентів, що обмежує його застосування в Україні переважно великими елеваторними підприємствами із значними фінансовими можливостями.



Рис. 7. Загальний вигляд зерноочисного обладнання лінійки LA/LB виробника Westrup A/S (Данія)

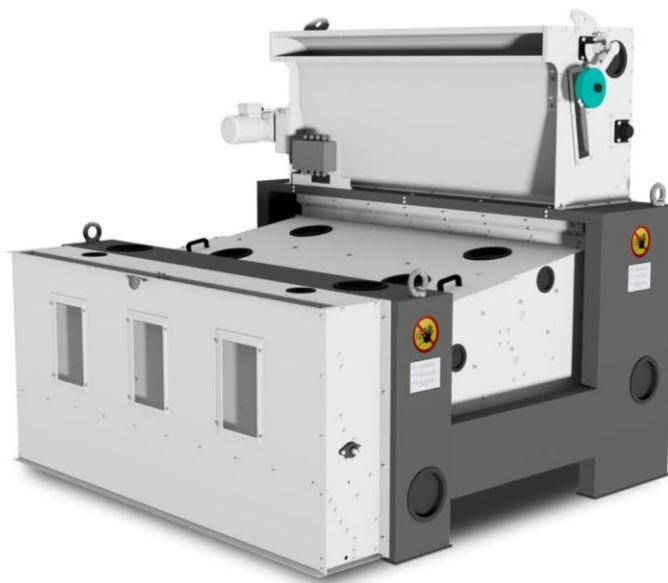


Рис. 8. Загальний вигляд зерноочисних агрегатів Bühler AG (Швейцарія)

Основні технічні характеристики широко вживаного зерноочисного обладнання на вітчизняних підприємствах зведені до таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльна технічна характеристика основних зерноочисних агрегатів

Показник	МПО-50 (Україна)	ЗВС-20А (Україна)	ІСМ-50 (Україна)	Cimbria Delta (Данія)	PETKUS K-Cleaner (ФРН)
Тип операції очищення	попереднє	первинне/ вторинне	первинне/ вторинне	первинне/ вторинне	первинне/ вторинне
Продуктивність, т/год	50	20	50	10–100	5–100
Тип решета	сіткове полотно	площинне штамп.	ротаційне	площинне	площинне
Кількість решітних планів	1 (полотно)	2×2	циліндр	2–4	2–4
Пневмосепарація	вертикал. канал	горизонт. канал	вертикал. канал	2-стадійна	2-стадійна
Самоочищення решіт	відсутнє	відсутнє	—	гум. кульки	гум. кульки
Питома потужність, кВт·год/т	0,22	0,28	0,15	0,12–0,18	0,14–0,20
Ефективність очищення, %	95–97	94–96	98–99	98–99,5	95–98
Рівень шуму, дБ	82–86	85–88	72–75	72–78	75–80
Вартість (відносна)	низька	низька	середня	висока	висока
Вимоги до обслуговування	низькі	низькі	середні	високі	середні

Аналіз даних, наведених в таблиці 1 свідчить, що вітчизняні зерноочисні машини (МПО-50, ЗВС-20А) суттєво поступаються зарубіжним аналогам за ефективністю очищення, рівнем шуму та питомою енергоємністю. Водночас вони є значно дешевшими, простішими в обслуговуванні та мають широку мережу постачання запасних частин в Україні. Це обумовлює їх домінування в структурі зерноочисного парку вітчизняних фермерських господарств та переробних підприємств.

Слід відмітити, що важливе місце в системі очищення врожаю займає зерноочисна машина МПО-50, яка у поєднанні з машинами первинного очищення, наприклад ЗВС-20А формує стандартну технологічну лінію

очищення у зернових господарствах середнього та великого розміру. Тому вдосконалення агрегату МПО-50 має пряме практичне значення для підвищення ефективності вирощування зернових колосових в умовах фермерських господарств України.

2.1.2. Аналіз показників якості очищення зерна та нормативні вимоги

Ефективність роботи будь-якої зерноочисної машини оцінюється системою технологічних показників, що визначені галузевими стандартами та методиками польових і лабораторних випробувань [10]. До основних показників відносяться:

1. Ефективність очищення зернового матеріалу від смітних домішок E_c , %, що характеризує частку смітних домішок, виділених із вихідної зернової маси:

$$E_c = \frac{(Q_{\partial 0} - Q_{\partial 1})}{Q_{\partial 0}} \cdot 100\%,$$

де $Q_{\partial 0}$ – вміст смітних домішок у вихідній зерновій масі, %;

$Q_{\partial 1}$ – вміст смітних домішок у очищеному зерні, %.

Для машин первинного очищення нормативне значення $E_c \geq 60$ %, для попереднього – $E_c \geq 50$ %.

2. Втрати повноцінного зерна у відходи P_z , % – відношення маси повноцінного зерна у фракції відходів до загальної маси зерна у вихідній суміші, що в символічному вигляді має такий зміст:

$$P_z = \frac{m_{ze}}{m_z} \cdot 100\%,$$

де m_{ze} – маса повноцінного зерна у відходах після очищення, кг;

m_z – загальна маса зерна до очищення, кг.

Нормативне значення складає $P_z \leq 0,5$ % для машин первинного очищення.

3. Питома продуктивність решета q , т/(год·м²) – відношення продуктивності машини до загальної площі решіт:

$$q = Q/F,$$

де Q – продуктивність машини, т/год;

F – загальна площа решіт зерноочисного агрегату, м².

4. Питома енергоємність процесу очищення W , кВт·год/т:

$$W = N_{вст}/Q,$$

де $N_{вст}$ – встановлена потужність електродвигунів, кВт;

Q – фактична продуктивність, т/год.

Для зерноочисної машини МПО-50:

$$W = 11/50 = 0,22 \text{ кВт·год/т.}$$

2.1.3. Конструкція, принцип роботи та технічна характеристика зерноочисної машини МПО-50

Машина попереднього очищення МПО-50 є стаціонарною зерноочисною машиною і призначена для попереднього очищення зернового вороху від великих і легких домішок з метою підготовки його до подальшого сушіння та первинного очищення. МПО-50 встановлюється у складі зерноочисно-сушильних комплексів типу КЗС та зерноочисних агрегатів ЗАВ [5, 11].

Відмінною конструктивною особливістю МПО-50 є використання як основного робочого органу для розділення компонентів зерноsumіші сітчастого транспортера (скальпера) замість традиційного плоского решета з ексцентриковим приводом. Це забезпечує неперервність процесу очищення і рівномірне переміщення зернового потоку, проте обмежує можливість ефективного відбору дрібних домішок.

Основні технічні характеристики зерноочисної машини МПО-50 наступні:

- продуктивність при очищенні пшениці (вологість $\leq 16\%$, засміченість $\leq 10\%$) – 50 т/год;
- встановлена потужність електродвигунів – 11 кВт (привід транспортера + вентилятор);
- спосіб подачі матеріалу на очищення – самотплинний зверху агрегату;
- розміри сітчастого транспортера – 2000×1200 мм;
- розмір отворів транспортерного полотна – 20×20 мм (для пшениці та ячменю);
- тип пневмосепарації – вертикальний аспіраційний канал;
- швидкість повітря в аспіраційному каналі – 6–12 м/с (регульована);
- відцентровий вентилятор з продуктивністю – 4 000–8 000 м³/год;
- габаритні розміри зерноочисної машини (Д $\times$ Ш $\times$ В) – $3700 \times 1800 \times 2600$ мм;
- маса агрегату для очищення зерна – 1050 кг.

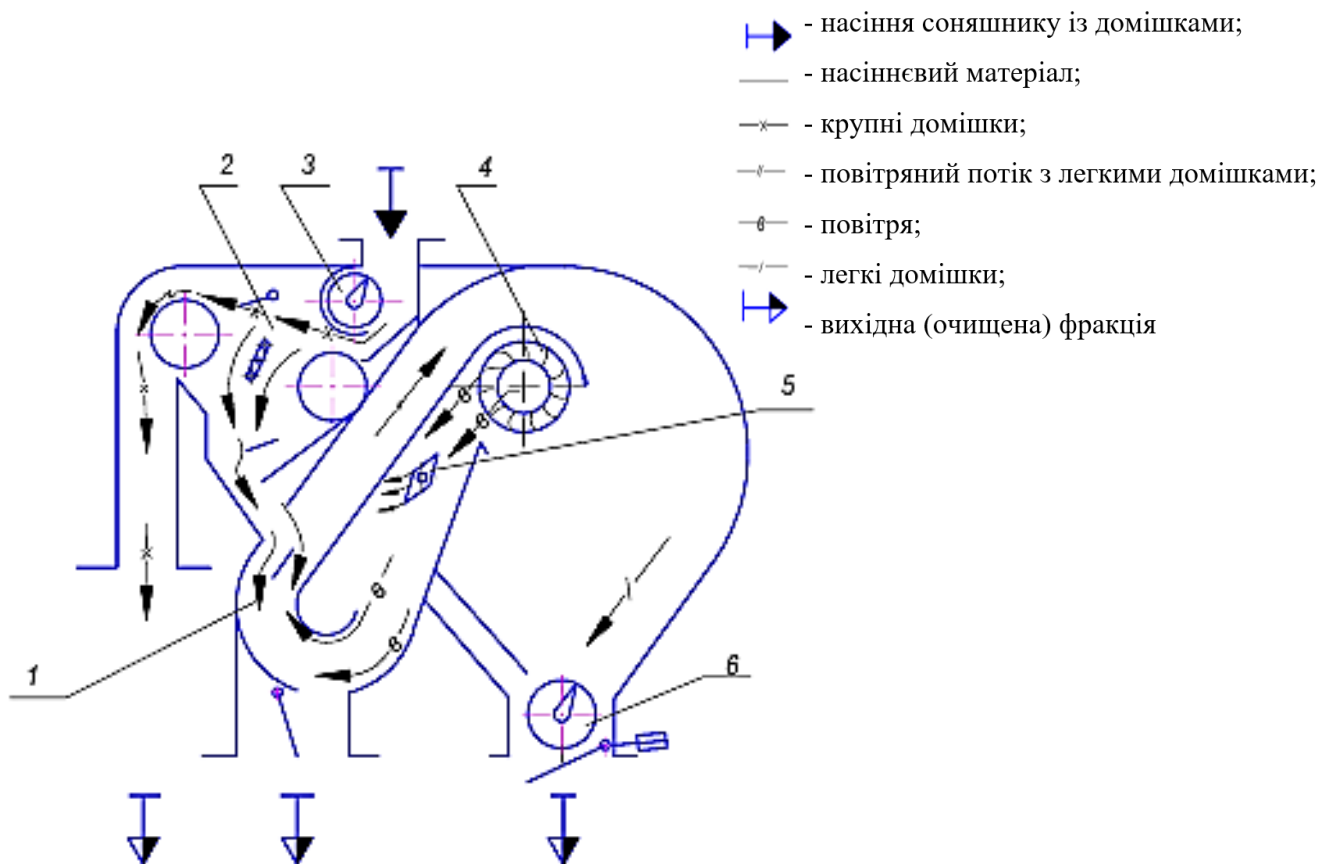


Рис. 9. Функціонально-технологічна схема зерноочисного агрегату МПО-50

Конструктивно зерноочисний агрегат МПО-50 включає такі основні складові (рис. 9): приймальний бункер з регульованою заслінкою-дозатором для рівномірної подачі зернової маси; розподілювач зернової маси по ширині транспортерного полотна 3; сітчастий транспортер (скальпер) 2 – основний робочий орган для відбору великих домішок; приводний барабан та натяжний барабан транспортерного полотна; вертикальний пневмосепаруючий канал 1 із регульованою заслінкою 5; відцентровий вентилятор з електродвигуном 4; осадова камера (циклон) з шлюзовим затвором для збирання легких домішок 6; патрубки виведення очищеного зерна та великих домішок (схід з полотна); рама-корпус з регульованими опорами.

Принцип роботи зерноочисної машини МПО-50 є таким. Зерновий ворох, що надходить від комбайна, подається до приймального бункера і через розподілювач 3 рівномірно розподіляється по ширині сітчастого транспортерного полотна 2. Сітчастий транспортер переміщує зернову масу знизу вгору під кутом $\alpha = 15\text{--}18^\circ$ до горизонту. При цьому зерно та дрібні домішки просипаються крізь отвори сітки та збираються на нижній приймальній частині, а великі домішки (солома, стебла, крупні камінці) утримуються на поверхні полотна і зсипаються у приймальник виведення відходів.

Зерновий матеріал, що пройшов крізь сітку, потрапляє у вертикальний пневмосепаруючий канал 1, через який проходить висхідний потік повітря, що нагнітається вентилятором 4. Надлишковий потік повітря відносить легкі домішки (полову, пил, пусті зернини, дрібні стеблові залишки) у циклон, де вони осаджуються та виводяться крізь шлюзовий затвор 6. Очищене від крупних і легких домішок зерно виводиться через нижній патрубок та спрямовується до наступного технологічного обладнання (сушарки або машини первинного очищення).

Швидкість сітчастого транспортера V_n регулюється зміною передаточного числа варіатора у діапазоні 0,05–0,15 м/с. Оптимальна швидкість для пшениці – 0,08–0,10 м/с. При меншій швидкості збільшується товщина шару зернової маси на полотні, що знижує просівання зерна через отвори. При більшій

швидкості зменшується час перебування зернової маси на сітчастому транспортері, що також погіршує ефективність виділення крепних домішок.

Питоме зернове навантаження на полотно сітчастого транспортера q_n , кг/(с·м) можна визначити таким чином

$$q_n = \frac{Q}{(3600 \cdot B)},$$

де Q – продуктивність зерноочисного обладнання, кг/год;

B – ширина транспортерного полотна, м.

Розрахуємо для зерноочисної машини МПО-50, враховуючи, що $Q = 50$ т/год = 50000 кг/год та $B = 1,2$ м. Після підстановки даних отримаємо:

$$q_n = \frac{50000}{(3600 \cdot 1,2)} = 11,57 \text{ кг/(с·м)}.$$

Умова проходження зернини крізь отвір сітчастого полотна. Зернина пройде крізь квадратний отвір розміром $a \times a$, якщо виконується наступна умова:

$$d_{\min} \leq a \cdot \cos \varphi,$$

де $d_{\min}$ – мінімальний поперечний розмір зернини (ширина або товщина), мм;

a – сторона квадратного отвору сітки, мм;

φ – кут між орієнтацією зернини та площиною отвору.

При розмірі отворів 20×20 мм і товщині зернини пшениці 2,5–4,0 мм остання умова виконується для зерна більшості зернових культур, а великі домішки (рештки стебел, збоїна, частки кошиків соняшнику тощо) не проходять крізь отвори.

2.1.4. Аналіз недоліків конструкції МПО-50 та обґрунтування необхідності вдосконалення

На підставі аналізу технічної документації, літературних джерел та результатів польових досліджень виявлено ряд основних недоліків конструкції зерноочисної машини МПО-50, що потребують усунення.

Перший виявлений недолік – це нерівномірний розподіл зернової маси по ширині полотна транспортера. Розподільувач МПО-50 являє собою похилий

лоток із трикутним поперечним перерізом. За даними досліджень, при подачі зернового матеріалу через такий пристрій відхилення питомого навантаження по ширині полотна може досягати 15–22%. Нерівномірне навантаження призводить до неоднакової товщини шару на полотні по ширині і, відповідно, нерівномірної ефективності просівання, появи «мертвих зон» з накопиченням матеріалу та зниженням загальної ефективності сепарації.

Ще один недолік – засмічення отворів сітчастого полотна при роботі з вологим зерном. При вологості зерна понад 18% частинки відсирілих стеблових залишків та зерна починають залипати в отворах полотна. Оскільки МПО-50 не має механізму самоочищення сітки, це призводить до поступового зменшення живого перерізу полотна і відповідного зниження продуктивності та ефективності сепарації. У польових умовах при роботі з вологим зерном оператори змушені зупиняти машину для ручного очищення полотна, що знижує змінну продуктивність зерноочисного комплексу.

Нестабільність аеродинамічних параметрів вертикального пневмосепаруючого каналу. Конструкція каналу МПО-50 не забезпечує рівномірного поля швидкостей повітряного потоку по перерізу. Аналіз аналогічних конструкцій засвідчив, що коефіцієнт варіації C_v швидкості повітря у каналах без напрямних пристроїв може становити 18–25%. Це призводить до: нестабільного виносу легких домішок (при низьких швидкостях у деяких зонах каналу домішки не виносяться); підвищених втрат повноцінного зерна з потоком повітря (при локально підвищеній швидкості зернини виносяться разом з домішками).

Підвищений рівень шуму. Відцентровий вентилятор МПО-50 та механічний привід транспортерного полотна генерують шум рівнем 82–86 дБ, що перевищує санітарні норми для обслуговуючого персоналу (80 дБ за ДСанПіН 3.3.6.037-99) при тривалій роботі. Основними джерелами шуму є аеродинамічний шум вентилятора та нерівномірний потік повітря в каналі; механічний шум від взаємодії полотна з барабанами та направляючими; резонансні явища у трубопроводах аспіраційної системи.

Обмежені можливості моніторингу та регулювання процесу очищення. МПО-50 не має засобів автоматичного контролю завантаження та якісних показників роботи. Оператор вимушений регулювати параметри (швидкість полотна, заслінку вентилятора) вручну, орієнтуючись виключно на зовнішні ознаки потоку. Відсутність зворотного зв'язку призводить до роботи машини у неоптимальних режимах протягом значної частини змінного часу.

Зведений аналіз основних недоліків зерноочисної машини МПО-50 та шляхи із усунення представленні у вигляді таблиці 2.

Таблиця 2

Зведений аналіз недоліків зерноочисної машини МПО-50 та запропоновані шляхи вдосконалення

Виявлений недолік	Кількісний прояв	Запропонований захід	Очікуваний ефект
Нерівномірний розподіл зернової маси	CV навантаження $\leq 15\text{--}22\%$	Вдосконалений розподільувач зі збільшеним кутом розкриття лотка $\beta \approx 30\text{--}35^\circ$	Зниження CV до $5\text{--}7\%$
Засмічення отворів сітчастого полотна	Зниження живого перерізу до $60\text{--}65\%$ при $W \geq 18\%$	Щіткові скребки або вібраційні очисники	Підтримання живого перерізу $\geq 85\%$
Нерівномірний розподіл швидкості у пневмоканалі	CV швидкості $\geq 18\text{--}25\%$	Профільовані напрямні пластини у вхідній секції каналу	Зниження CV до $8\text{--}12\%$
Підвищений рівень шуму	$82\text{--}86$ дБ (норма ≤ 80 дБ)	Вдосконалення геометрії вентилятора та звукоізоляція	Зниження до $78\text{--}80$ дБ
Відсутність контролю режимів	Ручне регулювання, нестабільні показники	Датчики навантаження та витрати повітря, інтерфейс оператора	Стабілізація показників очищення

2.2. Сучасний стан досліджень конструкцій та технологічних параметрів зерноочисних машин і напрямки їх вдосконалення

Науково-технічні дослідження у галузі зерноочисних машин охоплюють широкий спектр питань, від фундаментальних теоретичних основ сепарування зернових матеріалів до практичних інженерних рішень щодо вдосконалення

конкретних конструкцій. Нижче систематизовано основні напрямки досліджень вітчизняних та зарубіжних науковців із зазначенням конкретних результатів, що мають безпосереднє значення для вдосконалення зерноочисного агрегату МПО-50.

2.2.1. Дослідження пневматичної сепарації зернових матеріалів

Сепарація у вертикальних пневмосепаруючих каналах є одним із найбільш вивчених процесів у теорії зерноочисних машин. Дослідження О.В. Нестеренка, С.М. Лещенка, О.М. Васильковського та Д.І. Петренка (ЦНТУ, Кропивницький) [12], опубліковані у міжнародному журналі *INMATEH Agricultural Engineering* (2017), присвячені аналітичній оцінці якості пневматичної сепарації при багаторівневому введенні зернового матеріалу в канал.

Авторами розроблено конструкцію пневмосепаратора з пристроєм для багаторівневого введення зернового матеріалу та досліджено вплив такого способу подачі матеріалу в активну зону на якість очищення. У результаті дослідження отримано статистичну модель імовірності проходження легких домішок крізь шари зерна у пневматичному каналі у наступному вигляді:

$$P_{np} = \exp(-\mu \cdot h_{ш}),$$

де μ – коефіцієнт ослаблення, який визначається аеродинамічними властивостями домішок та густиною шару зерна, м^{-1} ;

$h_{ш}$ – висота шару зерна в перерізі пневмосепаруючого каналу, м.

Зі збільшенням питомого навантаження на переріз каналу (товщини шару зерна), ймовірність виділення легких домішок знижується за експоненційним законом.

Авторами також аналітично встановлено, що застосування пристрою багаторівневого введення зернового матеріалу в зону очищення матеріалу повітряним потоком дозволяє більш рівномірно розподілити зернову масу по всій площі перерізу каналу, зменшивши CV швидкості повітряного потоку і підвищивши ефективність виділення легких домішок.

Важливим узагальненням результатів аналізу пневматичного процесу у вертикальних каналах є дослідження Bulgakov V., Nikolaenko S., Holovach I., Adamchuk V., Kiurchev S., Ivanovs S. та Olt J. (2020) [13]. Авторами розглянуто рух частинок зернового матеріалу у вертикальному каналі в умовах пульсацій повітряного потоку та отримано диференціальне рівняння руху частинки в такому вигляді:

$$m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} = F_{aep} \cdot m \cdot g - F_{mp},$$

де m – маса частинки, кг;

x – координата вздовж вертикальної осі каналу, м;

F_{aep} – аеродинамічна сила, яка залежить від відносної швидкості між частинкою і повітрям та форми частинки;

g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;

F_{mp} – сила тертя частинки зерноsumіші об стінки каналу (для центральних зон каналу $F_{mp} \approx 0$).

У разі стаціонарного висхідного потоку, коли $dV/dt = 0$, а частинка рухається рівномірно ($d^2 x/dt^2 = 0$), умова рівноваги дає:

$$F_{aep} = m \cdot g,$$

що відповідає критичній швидкості витання V_{vit} частинки у висхідному потоці.

За умови, коли $V_{нов} > V_{vit}$ частинка підіймається у потоці повітря і ним виноситься у циклон; при $V_{нов} < V_{vit}$ – частинка опускається донизу та переходить у фракцію очищеного зерна.

Для сферичної частинки у квадратичному режимі обтікання ($Re > 1000$) аеродинамічна сила складає:

$$F_{aep} = C_x \cdot \left(\pi d^2 / 4 \right) \cdot \rho_n \cdot (V - V_q)^2 / 2,$$

де C_x – коефіцієнт опору форми (для сфери $C_x = 0,44$);

d – діаметр частинки, м;

ρ_n – щільність повітря, кг/м³;

V – швидкість повітря, м/с;

V_q – швидкість частинки, м/с.

Прирівнюючи останнє рівняння до $m \cdot g$ за умови $V_q = 0$ (частинка у спокої), отримаємо:

$$V_{vit} = \sqrt{\frac{4 \cdot m \cdot g}{3 \cdot C_x \cdot S \cdot \rho_n}}.$$

Для зернівки пшениці масою $m = 0,045$ г = $4,5 \times 10^{-5}$ кг, діаметром еквівалентної сфери $d_{екв} = 4,5$ мм = $4,5 \times 10^{-3}$ м та $\rho_n = 1,2$ кг/м³ при нормальних умовах:

$$V_{vit} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,5 \cdot 10^{-5} \cdot 9,81}{3 \cdot 0,44 \cdot \pi \cdot \frac{(4,5 \cdot 10^{-3})^2}{4} \cdot 1,2}} \approx 8,5 \text{ м/с}.$$

Це добре узгоджується із довідниковими значеннями критичної швидкості витання пшениці – 8,5–11,5 м/с [1]. Таким чином, робоча швидкість у пневматичному каналі МПО-50 має знаходитися у діапазоні 4,5–7,5 м/с, щоб забезпечити надійний відбір легких домішок ($V_{vit} \approx 1,5 - 3,5$ м/с) без надмірного виносу зерна.

Більш детальне дослідження аеродинаміки вертикального пневмосепаруючого каналу зерноочисних машин методом CFD-моделювання (ANSYS Fluent) було проведено у роботі [14]. Авторами встановлено, що основною причиною нерівномірності поля швидкостей у каналах без напрямних пристроїв є відривний рух потоку у місцях різкої зміни перерізу та появи вторинних повітряних потоків (завихрювань). Застосування профільованих напрямних пластин у вхідній секції каналу дозволило знизити CV швидкості з 22% до 8–10%, що відповідало зниженню втрат зерна з потоком повітря з 0,95% до 0,38%.

Дослідження Nesterenko A., Leshchenko S., Vasylkovskyi O. та Petrenko D. [12] показали, що моделювання аеродинамічного процесу розділення

попередньо стратифікованої зернової суміші у вертикальному пневмосепаруючому каналі дає змогу прогнозувати якість очищення та обґрунтовувати конструктивні параметри каналу. Авторами показано, що попередня стратифікація суміші (концентрування легких домішок у верхньому шарі) є ефективним методом підвищення якості пневматичної сепарації при збільшеному питомому навантаженні.

2.2.2. Дослідження рівномірності розподілу зернового матеріалу по робочій поверхні

Рівномірність завантаження решітної або транспортуючої поверхні зерною масою є головним впливовим фактором, що визначає загальну ефективність сепарації. Проблема нерівномірного розподілу детально досліджена у роботах О.М. Васильковського, С.М. Лещенка, С.М. Мороза та ін. (ЦНТУ, Кропивницький). У дослідженні [15] авторами вивчено вплив основних параметрів роботи сепаруючого транспортера на якість очищення зерна. Зокрема встановлено залежність ефективності сепарації від нерівномірності розподілу матеріалу у наступному вигляді:

$$E = E_{\max} \cdot (1 - 0,010 \cdot 20) = 0,80 \cdot E_{\max}.$$

Таким чином, нерівномірність $\delta = 20\%$ знижує ефективність сепарації на 20% від максимальної.

Дослідженнями [15] встановлено, що оптимальний кут розкриття розподільного лотка β , що забезпечує мінімальний CV по ширині B дорівнює:

$$\beta_{\text{opt}} = \arctg(2 \cdot h_0 \cdot V_0 \cdot f(B)),$$

де h_0 – висота шару зерна на вході в лоток, м;

V_0 – швидкість зернового потоку на входному перерізі, м/с;

$f(B)$ – функція ширини полотна, що враховує поперечну дифузію потоку.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень [15] показали, що для ширини полотна 1,0–1,5 м оптимальний кут $\beta = 28\text{--}36^\circ$, тоді як у конструкції зерноочисної машини МПО-50 цей кут становить лише $20\text{--}22^\circ$.

Аналогічні результати для решітних сепараторів отримано у дослідженні Vasylovskiy O. et al. (2019) [15], яке присвячене аналізу сепаруючого транспортера оригінальної конструкції. Авторами підтверджено, що збільшення кута розкриття живильного пристрою від 18° до 34° знизило відхилення питомого навантаження по ширині полотна з 19,4% до 5,6%, що зумовило підвищення ефективності сепарації на 14,2%.

2.2.3. Дослідження динаміки коливальних систем зерноочисних машин та засоби їх вдосконалення

Проблема вібраційних характеристик зерноочисних машин є багатоаспектною і стосується як технологічних параметрів (амплітуда та частота коливань решітного стану), так і загальної динаміки машини (рівень вібрацій рами, динамічні навантаження на підшипникові вузли). Дослідженням застосування лінійного асинхронного двигуна (ЛАД) для приводу сіткового стана зерноочисної машини присвячено роботу [16]. Авторами розроблено математичну модель технологічного процесу на решітному стані та системи ЛАД-сито, а також запропоновано адаптивну систему керування ЛАД. Встановлено, що при частоті коливань сита 340 хв^{-1} досягається максимальна повнота виділення крупної фракції для зерна ячменю, а оптимальний діапазон частот для сортування ячменю на фракції – $280\text{--}370 \text{ хв}^{-1}$.

В своїх дослідженнях Bulgakov V., Adamchuk V., Ivanovs S. та Ihnatiev Y. (2017) [17] оцінили вплив параметрів коливань решітного полотна на процес сепарації зернових матеріалів. Авторами встановлено, що ефективність транспортування зерна по решітці визначається числом транспортування T_q , що описується залежністю:

$$T_q = \frac{A \cdot \omega^2 \cdot \sin \alpha}{g \cdot \cos \gamma},$$

де A – амплітуда коливань, м;

ω – кутова частота коливань, рад/с;

α – кут відхилення траєкторії від горизонту;

γ – кут нахилу решета.

Транспортування зерна вздовж решета відбувається при $T_q > 1$. Авторами показано, що підвищення T_q понад оптимальне значення $T_{q,opt} = 1,2 - 1,5$ призводить до зменшення часу перебування зерна на решеті і, відповідно, зниження повноти виділення домішок.

Значний інтерес представляють дослідження динамічного навантаження решіт зерноочисних машин, опубліковані у журналі MDPI Processes [18]. Авторами вивчено вплив фізичних та конструктивних параметрів на довговічність решіт. Методом скінченних елементів (FEM, Pro/ENGINEER) досліджено розподіл еквівалентних напружень у перфорованих решетах з базовими трикутними отворами та з отворами у формі епіциклоїди (інноваційна форма). Встановлено, що застосування отворів у формі епіциклоїди підвищує довговічність перфорованого решета на 12,3%. Крім того, показано, що рівномірне завантаження решета зерною масою суттєво знижує максимальні напруження та підвищує ресурс решіт.

Дослідженням кута нахилу решітної поверхні у роторному очисному пристрої присвячено роботу Конорка S. et al. [19] (Польща). Авторами вивчено вплив кута нахилу ситового барабана (у діапазоні від $-7,5^\circ$ до $+10,5^\circ$) на показники очищення вівса. Встановлено, що оптимальний кут нахилу обмежується діапазоном $\pm 2,5^\circ$ від горизонтального положення, а при виході за межі цього діапазону ефективність очищення різко знижується. Авторами отримані залежності коефіцієнтів сепарації кожної фракції від кута нахилу для декількох значень частоти обертання барабана і питомого навантаження.

Щодо ефективного кута нахилу класичних плоских решіт, Harrison та Blecha (1983) [20], на яких посилаються численні сучасні дослідження, встановили, що транспортування частинок уздовж коливального решета є функцією частоти та амплітуди коливань, кута нахилу решета, кута підвісок та тертя між частинкою та решетом. Дослідженнями Simonyan K.J. та Yiljper Y.D. [21] підтверджено, що зі збільшенням частоти коливань ефективність очищення

спочатку зростає, досягає максимуму, а потім знижується через зменшення часу перебування матеріалу на робочій поверхні решета.

2.2.4. Дослідження математичних моделей процесу очищення зерна

Математичне моделювання є потужним інструментом для аналізу та оптимізації технологічних параметрів зерноочисних машин. Узагальнена математична модель функціонування пневморешітних машин та решітних модулів розроблена і опублікована V.A. Serdyuk [22]. Авторами запропоновано розрахункові схеми решітних модулів кількох типів (Petkus A12, Clipper Prelude, Cimbria тощо) та проведено їх моделювання.

На основі регресійних рівнянь, що адекватно описують процеси на решетах, авторами [22] отримано показники чистоти зернового матеріалу та повноти виділення домішок у вигляді залежностей для машин з різними схемами функціонування решітних модулів. У загальному вигляді концентрація i -го компоненту зернової маси вздовж решета описується рівнянням:

$$\frac{dc_i}{d\xi} = -k_i \cdot c_i,$$

де c_i – концентрація i -го компоненту, кг/кг;

ξ – безрозмірна координата вздовж поверхні решета (від 0 до 1);

k_i – константа вилучення i -го компоненту (визначається параметрами решета та властивостями зерна).

Провівши інтегрування останнього рівняння отримаємо:

$$c_i(\xi) = c_{i0} \cdot \exp(-k_i \cdot \xi),$$

де c_{i0} – початкова концентрація на вході решета.

Ефективність виділення i -го компонента за всю довжину решета ($\xi = 0 \rightarrow \xi = 1$) складає:

$$E_i = 1 - \exp(-k_i).$$

При $k_i = 1,0$: $E_i = 1 - e^{-1} \approx 63\%$; при $k_i = 2,0$: $E_i \approx 86\%$; при $k_i = 3,0$: $E_i \approx 95\%$. Таким чином, для досягнення ефективності $> 95\%$ потрібно щоб

$k_i > 3,0$, що, як правило, реалізується при відповідно підібраних кінематичних параметрах зерноочисної машини та розмірах решета.

Для оцінки ефективності очищення зернового матеріалу у вертикальному пневматичному каналі при збільшенні навантаження Nesterenko A. et al. [12] виконали моделювання процесу розділення попередньо стратифікованої зернової суміші. Авторами отримана модель, що описує зміну концентрації легких домішок по висоті каналу з урахуванням їх затримки у шарах зерна. Результати моделювання підтвердили, що попередня стратифікація суміші підвищує якість очищення при значному питомому навантаженні.

Adamchuk V., Bulgakov V. та ін. (2021) [17] розробили теоретичну модель віброцентрифужної сепарації зернових сумішей на безрешітній насіннєочисній машині. Авторами розроблено математичні моделі руху частинок по поверхні пневмовіброцентрифуги та визначено умову найкращого розділення частинок за комплексом фізико-механічних властивостей (щільність, геометричні розміри, аеродинамічні властивості насіння тощо).

Дослідженнями з оптимізації параметрів відокремлення насіння гречки [23] встановлено залежність ефективності сепарації від основних конструктивних та режимних параметрів. Авторами використано оригінальні алгоритми для оптимізації параметрів решітного сепаратора, що дозволило підвищити сумарний індекс ефективності відокремлення на 12–18% порівняно з параметрами, отриманими методом повного факторного планування експерименту.

2.2.5. Сучасні тенденції вдосконалення зерноочисного обладнання

На підставі аналізу сучасних публікацій у наукових виданнях можна виділити такі перспективні напрямки вдосконалення зерноочисних машин, що активно реалізуються у провідних наукових та науково-дослідних установах.

Напрямок 1. Автоматизація та цифровізація управління зерноочисними машинами. За даними огляду ринку зерноочисного обладнання [7], провідні виробники (Cimbria, PETKUS, Bühler) масово впроваджують системи HMI/PLC-

управління, IoT-сенсори для реального моніторингу параметрів роботи та алгоритми автоматичної оптимізації режимів. Cimbria Delta Super оснащується НМІ на базі Siemens PLC з можливістю зберігання точних налаштувань для різних культур [8]. Дослідженнями встановлено, що перехід на автоматичне управління знижує питомі втрати зерна у 1,5–2,0 рази та скорочує час налаштування машини при зміні культури з 45–60 до 10–15 хвилин.

Напрямок 2. Застосування CFD-моделювання для оптимізації аеродинаміки пневматичних систем. Чисельне моделювання (CFD) є стандартним інструментом проектування пневматичних систем сучасних зерноочисних машин. Результати CFD-моделювання пневмоканалів [14] показали, що встановлення профільованих напрямних пластин у вхідній секції дозволяє знизити CV швидкості з 22% до 8–10%. Аналогічні результати отримані для систем вторинної аспірації у дослідженнях [12].

Напрямок 3. Застосування методу дискретних елементів (DEM) для моделювання процесу сепарації зернових сумішей. Метод DEM широко застосовується для моделювання руху сипких матеріалів на решетах та в пневматичних каналах [22]. Результати DEM-моделювання добре узгоджуються з експериментальними даними і дозволяють аналізувати процес сепарації частинок несферичної форми, що особливо актуально для зерна з нестандартними розмірами.

Напрямок 4. Розробка новітніх конструкцій решіт з підвищеною ефективністю. Перспективним є застосування перфорованих решіт з отворами нетрадиційної форми. Дослідженнями [18] показано, що отвори у формі епіциклоїди, розроблені вченими ПНТУ (Польща), забезпечують більш високу швидкість проходження зернового матеріалу через отвори і підвищують ресурс решіт на 12,3% порівняно з круглими отворами. Такі решета можуть бути використані для підвищення ефективності очищення та зменшення засмічення очищеного збіжжя.

Напрямок 5. Підвищення енергоефективності зерноочисних машин. Дослідженнями у рамках концепції BAT (Best Available Technologies) [4]

встановлено, що застосування частотного регулювання приводів вентиляторів дозволяє знизити питомі витрати електроенергії на 20–30% порівняно з машинами зі стаціонарними режимами роботи. Для зерноочисного комплексу зі споживанням 11–15 кВт це дозволяє заощадити 2000–3500 кВт·год за збиральний сезон.

Напрямок 6. Застосування самоочисних механізмів для решіт та сітчастих поверхонь. Механізм самоочищення гумовими кульками (Ball Box System, Cimbria) є перевіреним рішенням для запобігання засміченню отворів решіт при роботі з вологим або надто засміченим зерном [8]. Система Cimbria передбачає розміщення між нижньою і верхньою сітками шару гумових кульок, які при коливаннях решета відскакують і вибивають частинки, що застрягли в отворах. Забезпечується підтримання ефективного живого перерізу решета $\geq 85\text{--}90\%$ навіть при роботі з зерном вологістю 18–22%.

2.2.6. Аналіз вибору напрямку досліджень та вдосконалення зерноочисної машини МПО-50

Проведений аналіз сучасного стану досліджень і конструкцій зерноочисних машин дозволяє сформулювати науково обґрунтований вибір напрямків вдосконалення зерноочисного агрегату МПО-50.

По-перше, ключовою проблемою, що суттєво знижує ефективність роботи зерноочисної машини МПО-50, є нерівномірність розподілу зернової маси по ширині сітчастого транспортера. Дослідженнями [15] доведено, що нерівномірність завантаження $\delta = 20\%$ призводить до зниження ефективності сепарації на 20% від максимальної. Ліквідація цього недоліку шляхом вдосконалення розподільного лотка є найбільш ефективним і порівняно простим підходом.

По-друге, засмічення отворів сітчастого полотна при підвищеній вологості зерна є суттєвим технологічним обмеженням, особливо в умовах необхідності очистки перезволоженого збіжжя. Впровадження механізму очищення сітки (щіткові очисники або вібраційні скребки) є обов'язковим для

забезпечення стабільної роботи МПО-50 у широкому діапазоні вихідних умов зерноsumіші.

По-третє, оптимізація аеродинаміки пневматичного каналу МПО-50 шляхом встановлення профільованих напрямних пластин, яка ґрунтується на результатах CFD-аналізу [14] та рекомендаціях Nesterenko A. et al. [12], дозволить суттєво підвищити ефективність відбору легких домішок та знизити втрати зерна з відходами.

Таким чином, вдосконалення конструкції МПО-50 слід проводити комплексно за трьома основними напрямками:

- вдосконалення розподільвача зернової маси на сітчастому транспортері;
- введення до конструкції механізму самоочищення сітчастого полотна;
- оптимізація аеродинаміки пневмосепаруючого каналу.

Саме наведені вище заходи забезпечать найбільший накопичувальний ефект підвищення якості та продуктивності очищення зерна без суттєвої зміни базової конструкції зерноочисної машини МПО-50.

3. НАУКОВА ЧАСТИНА

3.1. Теоретичне обґрунтування вдосконаленого розподільвача зернової маси

3.1.1. Постановка задачі та вихідні передумови

Як встановлено у розділі 2, нерівномірний розподіл зернової маси по ширині сітчастого транспортера є одним із головних чинників, що знижують ефективність сепарації у зерноочисній машині МПО-50. За даними Vasylovskyi O. et al. [15], відхилення питомого навантаження δ по ширині полотна до 20% спричиняє зниження ефективності сепарації на 16–20% від максимального значення. Тому теоретичне обґрунтування конструктивних параметрів вдосконаленого розподільвача є важливим завданням наукової частини роботи.

Конструктивна схема базового розподільвача зерноочисної машини МПО-50 представляє собою трикутний у поперечному перерізі лоток із кутом розкриття $\beta_0 = 20...22^\circ$. Зерновий потік надходить у лоток зверху і розподіляється по ширині $B = 1200$ мм сітчастого транспортера самопливом. Недостатній кут розкриття в базовому агрегаті призводить до концентрації зернового потоку в центральній частині полотна.

Запропоноване вдосконалення полягає у заміні базового лотка на профільований трапецієподібний розподільвач з плавно змінним поперечним перерізом і збільшеним кутом розкриття $\beta = 32...35^\circ$, а також у встановленні рівномірно розташованих поперечних ребер-розсіювачів для спрямованого розподілу зернового потоку (рис. 10).

3.1.2. Математична модель розподілу зернового потоку

Розглянемо рух зернового матеріалу у розподільному лотку як квазістаціонарного потоку в'язкопластичного середовища. Для опису поперечного розподілу потоку скористаємося підходом, запропонованим у роботах Moroz S.M., Vasylovskyi O.M. та ін. [24, 25], що базується на рівнянні нерозривності потоку сипкого матеріалу.

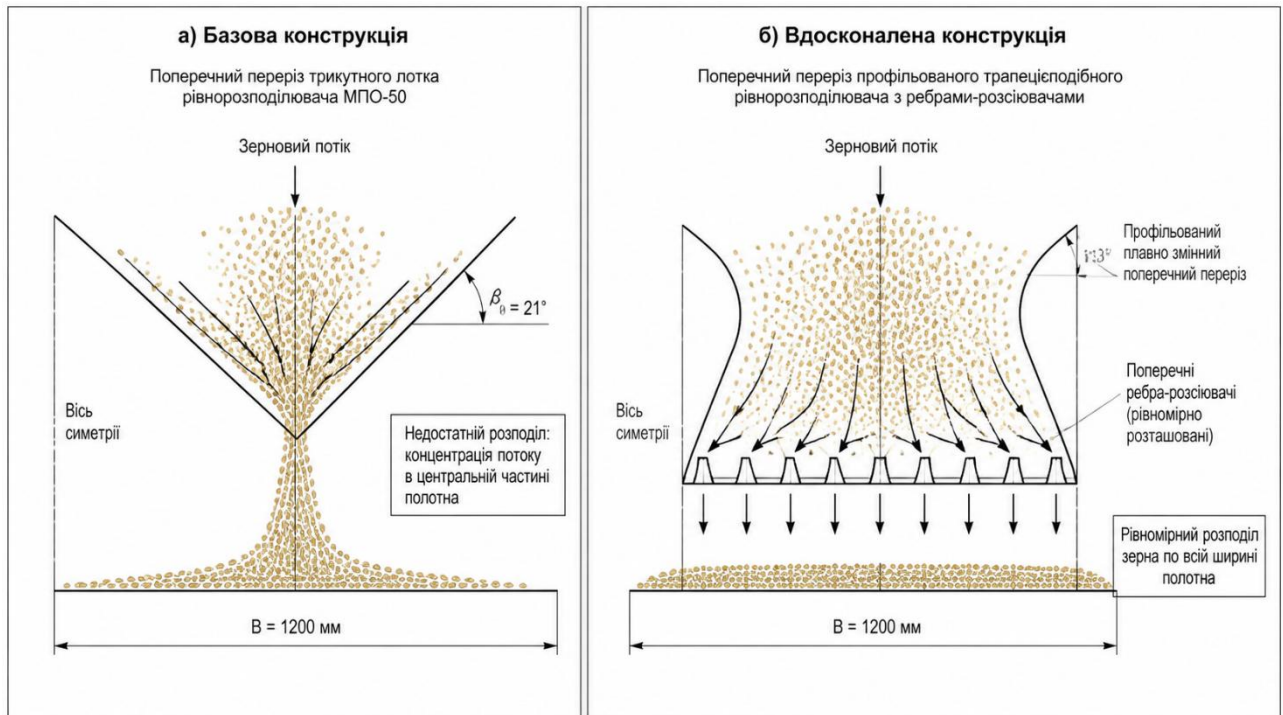


Рис. 10. Схема серійного та вдосконаленого розподільювача зернового матеріалу зерноочисної машини МПО-50

Введемо систему координат вісь x , яка направлена вздовж напрямку руху зернового матеріалу по поверхні лотка, вісь y – направлена у поперечному напрямку (по ширині полотна). Питома витрата зернового матеріалу через живильник $q(x, y)$, кг/(м·с) задовольняє рівнянню нерозривності:

$$\frac{\partial(h \cdot V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(h + V_y)}{\partial y} = 0,$$

де $h(x, y)$ – локальна висота шару зернового матеріалу, м;

V_x, V_y – складові швидкості матеріалу вздовж осей x та y відповідно, м/с.

Для поверхні лотка, нахиленої під кутом α до горизонту, рух матеріалу в напрямку y (впоперек потоку) визначається поперечною складовою сили тяжіння та силою тертя. У квазістаціонарному режимі при малих кутах відхилення від осі x :

$$V_y = \left(g \cdot \sin\left(\frac{\beta}{2}\right) - \mu_c \cdot g \cdot \cos(\alpha) \right) \cdot t_p,$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с²;

β – кут розкриття живильного лотка;

μ_c – коефіцієнт тертя зернового матеріалу по поверхні лотка (для сталі прийmemo $\mu_c = 0,35 \dots 0,42$ при роботі із пшеницею);

t_p – час руху частинки від точки введення до краю живильного лотка, с.

Для забезпечення рівномірного розподілу необхідно, щоб поперечна складова швидкості V_y була достатньою для відхилення потоку до краю полотна шириною $B = 1,2$ м за час $t_p \leq L/V_x$ (де L – довжина розподільного лотка, м).

Звідси мінімальний кут розкриття складає:

$$\beta_{\min} = 2 \arcsin \left(\frac{B \cdot V_x}{2 \cdot L \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot t_p} \right).$$

Підставляючи значення для зерноочисної машини МПО-50, а саме – $B = 1,2$ м; $L = 0,8$ м (довжина лотка); $V_x = 0,5$ м/с (швидкість зернового потоку по лотку); $\alpha = 30^\circ$ (кут нахилу лотка), отримаємо

$$t_p = L/V_x = 0,8/0,5 = 1,6 \text{ с.};$$

$$\beta_{\min} = 2 \arcsin \left(\frac{1,2 \cdot 0,5}{2 \cdot 0,8 \cdot 9,81 \cdot \cos 30^\circ \cdot 1,6} \right) \approx 2 \cdot \arcsin(0,0275) \approx 3,15^\circ.$$

Розраховане вище значення є мінімально необхідним кутом, однак не враховує нелінійний характер розподілу. З урахуванням взаємодії між шарами зерна та поперечного розсіювання потоку (ефект «зернових хвиль»), що описано у роботі Moroz S.M., Vasylykovskyi O.M. [25], оптимальний кут розкриття з умови мінімального CV розподілу становить $\beta_{\text{opt}} = 32 \dots 35^\circ$.

Перевищення $\beta > 35^\circ$ призводить до надмірного розсіювання матеріалу на краях лотка та утворення застійних зон у центрі. Таким чином, для вдосконаленої конструкції розподілювача МПО-50 приймаємо кут розкриття $\beta = 33^\circ \pm 1^\circ$.

3.1.3. Розрахунок поперечних ребер-розсіювачів

Для додаткового вирівнювання потоку у запропонованій конструкції передбачено встановлення $n = 3$ рівномірно розташованих поперечних ребер-розсіювачів трикутного профілю (рис. 10). Кожне ребро відхиляє потік

симетрично в обидва боки від осі. Висота ребра h_p та кут атаки φ_p пов'язані умовою, що поперечна складова швидкості після відхилення дорівнює V_y .

Враховуючи це, запишемо:

$$h_p = \frac{(V_y \cdot L)}{(V_x \cdot \operatorname{tg}(\varphi_p))},$$

де φ_p – рекомендований кут атаки ребра, враховуючи [24], прийmemo $\varphi_p = 45^\circ$.

При $V_y = 0,12$ м/с, $L = 0,27$ м (крок між ребрами при $n = 3$), $V_x = 0,5$ м/с, отримаємо:

$$h_p = \frac{(0,12 \cdot 0,27)}{(0,5 \cdot 1,0)} = 0,065 \text{ м} \approx 65 \text{ мм.}$$

Ширина ребра $b_p = \frac{B}{(n+1)} = \frac{1,2}{4} = 0,30$ м, що відповідає стандартному поділу потоку на рівні частини.

3.2. Теоретичне обґрунтування механізму очищення сітчастого транспортера

3.2.1. Аналіз механізму засмічення отворів сітки транспортера

Засмічення отворів сітчастого полотна транспортера є одним із основних факторів, що знижують ефективність роботи зерноочисної машини МПО-50, зокрема при роботі з вологим зерном ($W > 17\%$). Механізм забивання транспортера полягає в адгезійному прилипанні частинок зерна та частин стебел до поверхні дротин сітки транспортера внаслідок капілярних сил вологої плівки та механічного заклинювання часток, що мають розміри, близькі до розміру отвору.

Силу адгезії частинки до поверхні дроту сітки при наявності рідкої плівки можна оцінити через формулу Дерягіна [26]:

$$F_{адз} = 4 \cdot \pi \cdot r \cdot \gamma \cdot \cos(\theta),$$

де r – радіус частинки або ефективний радіус контакту, м;

γ – поверхневий натяг води, Н/м., (при 20°C $\gamma = 0,0728$ Н/м);

θ – крайовий кут змочування, для зерна пшениці $\theta \approx 60\text{--}70^\circ$, при $r = 1 \text{ мм} = 0,001 \text{ м}$.

Після підстановки наведених величин в останню формулу отримаємо

$$F_{адз} = 4 \cdot \pi \cdot 0,001 \cdot 0,0728 \cdot \cos(65^\circ) \approx 3,86 \times 10^{-4} \text{ Н.}$$

Для відриву прилиплої частинки від поверхні необхідно прикласти силу відриву $F_{від} \geq F_{адз}$. Саме представлена умова і покладена в основу проектування механізму очищення щіткового типу сіткового транспортера.

3.2.2. Конструкція вдосконаленого механізму очищення сітки транспортера та розрахунок сили очищення ворсиною щітки

Запропонована конструкція механізму очищення сітчастого транспортера МПО-50 конструктивно виконується у вигляді обертової щіткової балки, розміщеної на нижній (зворотній) гілці транспортерного полотна (рис. 11, 12). Щітка виконана з пружних поліамідних ворсин діаметром $d_{\text{в}} = 0,8 \text{ мм}$ та довжиною $l_{\text{в}} = 25 \text{ мм}$. Балка встановлена впоперек полотна і приводиться в обертання від окремого електродвигуна сумарною потужністю $N_{\text{щ}} = 0,55 \text{ кВт}$ із частотою обертання $n_{\text{щ}} = 300\text{--}600 \text{ хв}^{-1}$.

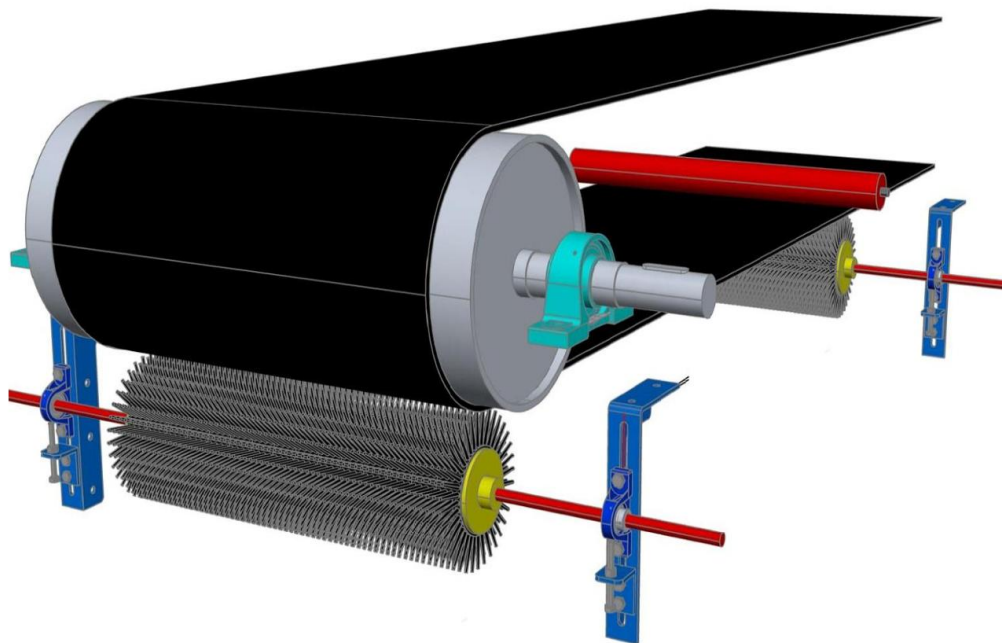


Рис. 11. 3D модель механізму очищення сітчастого транспортера зерноочисної машини МПО-50

Параметри щітки: $d_{\text{б}} = 0,8 \text{ мм}$, $l_{\text{б}} = 25 \text{ мм}$
 Електродвигун: $N_{\text{щ}} = 0,55 \text{ кВт}$, $n_{\text{щ}} = 300 \dots 600 \text{ хв}^{-1}$

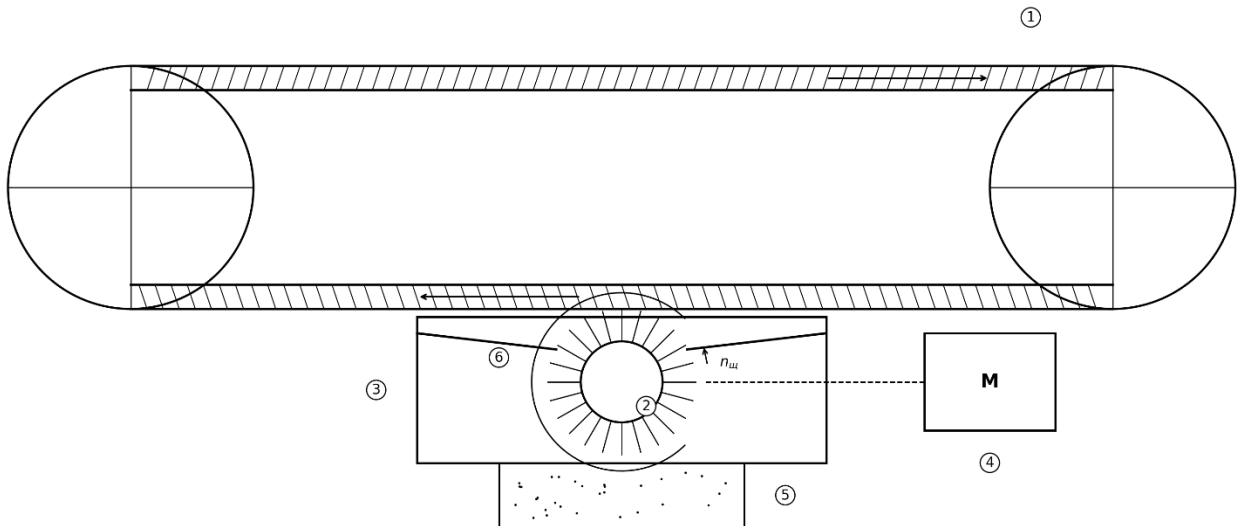


Рис. 12. Функціональна схема очищення сітчастого транспортера зерноочисної машини МПО-50:

- 1 – полотно транспортера; 2 – щітковий барабан; 3 – кожух очисника;
 4 – електродвигун привода щіткового очисника; 5 – бункер виділених часток;
 6 – напрямні козирьки

Розглянемо взаємодію ворсини щітки з заклиненою часткою. При обертанні щіткового барабану із кутовою швидкістю $\omega_{\text{щ}} = \frac{2\pi \cdot n_{\text{щ}}}{60}$, найвіддаленіший край ворсини рухається зі швидкістю:

$$V_{\kappa} = \omega_{\text{щ}} \cdot R_{\text{щ}},$$

де $R_{\text{щ}}$ – радіус щітки, м.

Контактна сила ворсини F_{κ} при натисканні ворсини на частинку (пружне відхилення ворсини на величину Δ) визначається наступним чином:

$$F_{\kappa} = \frac{E_{\text{б}} \cdot d_{\text{б}}^4 \cdot \Delta}{8 \cdot l_{\text{б}}^3},$$

де $E_{\text{б}}$ – модуль пружності матеріалу ворсини, так для поліаміду $E_{\text{б}} \approx 2,7 \text{ ГПа} = 2,7 \times 10^9 \text{ Па}$.

При $\Delta = 3 \text{ мм} = 0,003 \text{ м}$, що характерно для типового натяг ворсини, та $d_{\text{в}} = 0,8 \text{ мм} = 8 \times 10^{-4} \text{ м}$, $l_{\text{в}} = 25 \text{ мм} = 0,025 \text{ м}$ отримаємо контактну силу ворсини очисника:

$$F_{\kappa} = \frac{2,7 \cdot 10^9 \cdot (8 \cdot 10^{-4})^4 \cdot 0,003}{8 \cdot 0,025^3} \approx 0,0133 \text{ Н.}$$

Порівнюючи $F_{\kappa} = 0,0133 \text{ Н}$ із розрахованою раніше силою адгезії $F_{\text{адг}} \approx 3,86 \times 10^{-4} \text{ Н}$, отримаємо таку умову:

$$\frac{F_{\kappa}}{F_{\text{адг}}} = \frac{0,0133}{0,000386} \approx 34,5 \gg 1.$$

Остання нерівність повністю підтверджує достатність сили контакту ворсини для відриву прилипших часток на сітчастому транспортері. Коефіцієнт запасу за силою очищення становить ~ 34 , що є більш ніж достатнім для надійного очищення сітки навіть при вологості зерна до 22–24%.

Продуктивність очищення (кількість отворів, очищуваних за одиницю часу) визначається частотою обертання щітки та густотою ворсяного покриття зазначеного робочого органу. При щільності ворсяного покриття $\rho_{\text{в}} = 200 \text{ ворсин/см}^2$ та ширині щітки $B_{\text{щ}} = 1,2 \text{ м}$, і частоті обертання $n_{\text{щ}} = 450 \text{ хв}^{-1}$, за один оберт щітка очищає

$$S_{\text{оч}} = \pi \cdot D_{\text{щ}} \cdot B_{\text{щ}} \cdot \rho_{\text{в}} = \pi \cdot 0,20 \cdot 1,2 \cdot 200 \cdot 10^4 = 1,508 \cdot 10^6 \text{ контактів/об.},$$

що з урахуванням розміру отворів сітки $20 \times 20 \text{ мм}$ (площа отвору $400 \text{ мм}^2 = 4 \text{ см}^2$) при питомій густоті решітки 100 отворів/м^2 забезпечує повне очищення всієї поверхні сітки ($1,2 \times 2,0 = 2,4 \text{ м}^2$) за 1 оберт щітки.

3.3. Теоретичне дослідження аеродинаміки вертикального пневмосепарувального каналу

3.3.1. Аналіз нерівномірності поля швидкостей у базовій конструкції зерноочисної машини МПО-50

Ефективність пневматичного (аеродинамічного) виділення легких домішок у машині МПО-50 суттєво залежить від рівномірності поля швидкостей

повітряного потоку в перерізі аспіраційного каналу. За даними аналітичного дослідження [14], нерівномірність поля швидкостей ($CV \geq 18\text{--}25\%$ у базовій конструкції) зумовлена різким розширенням перерізу каналу біля вхідного патрубку; нерівномірним введенням зернового матеріалу у канал; відривним рухом потоку з утворенням вихрових зон.

Для кількісної оцінки нерівномірності використовуємо коефіцієнт варіації швидкості:

$$CV = \frac{\sigma_V}{\bar{u}_V} \cdot 100\%,$$

де σ_V – середньоквадратичне відхилення швидкості потоку повітря по перерізу каналу, м/с;

$\bar{u}_V$ – середня швидкість повітряного потоку, м/с.

Залежність ефективності пневмосепарації E_n від CV встановлена у роботі [14]:

$$E_n = E_{n.\max} \cdot (1 - k_n \cdot CV),$$

де $E_{n.\max}$ – максимальна ефективність при рівномірному потоці;

k_n – коефіцієнт чутливості, $k_n = 0,012$.

За умови, що $CV = 22\%$ та $E_{n.\max} = 98\%$ отримаємо:

$$E_n = 98 \cdot (1 - 0,012 \cdot 22) = 98 \cdot 0,736 = 72,1 \, \%.$$

Отже, нерівномірність $CV = 22\%$ знижує ефективність пневмосепарації зерноочисного агрегату до 72% від максимального значення. Встановлення напрямних пластин в пневмосистему для зниження нерівномірності CV до 9% дозволяє досягти

$$E_n = 98 \cdot (1 - 0,012 \cdot 9) = 98 \cdot 0,892 = 87,4 \, \%.$$

Таким чином, підвищення ефективності пневмосистеми зерноочисної машини відбувається на $87,4 - 72,1 = 15,3$ відсоткових пунктів.

3.3.2. Обґрунтування конструкції профільованих напрямних пластин

Для вирівнювання поля швидкостей у вхідній секції пневмоканалу зерноочисної машини МПО-50 запропоновано встановлення системи профільованих напрямних пластин, геометрія яких обрана на основі методики проектування аеродинамічних направляючих апаратів [27]. Профіль пластин являє собою дугу кола радіуса $R_n = 120$ мм та кутом охопту $\varphi_n = 60^\circ$, що відповідає NASA типу 4415 у спрощеному виконанні для сільськогосподарських умов (рис. 13).

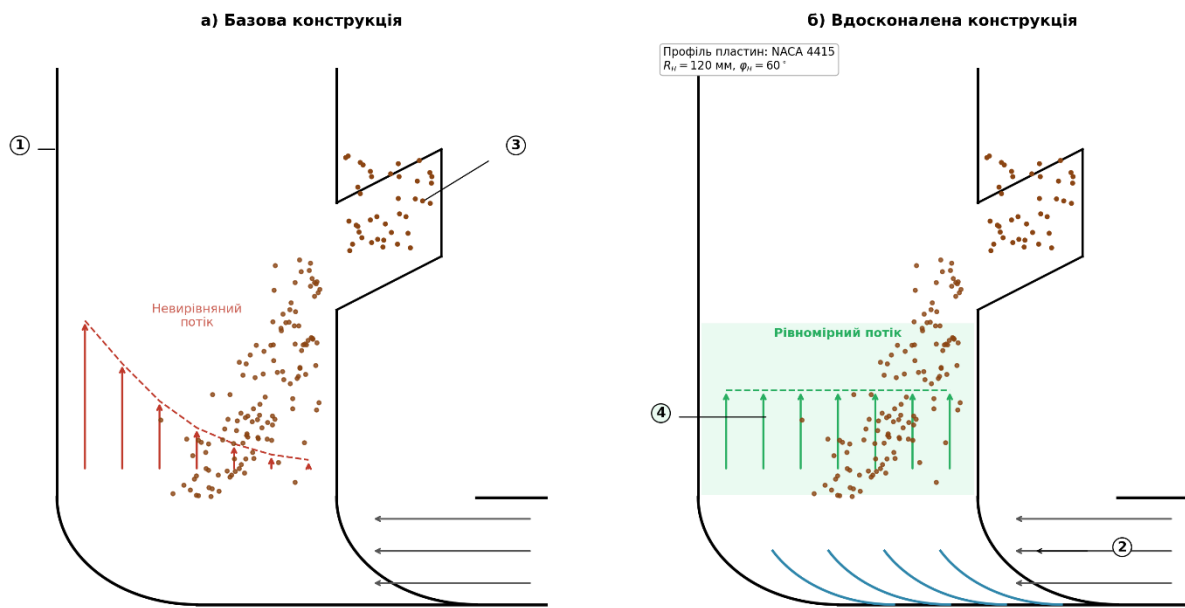


Рис. 3.4 – Поперечний переріз вертикального пневмосепарувального каналу МПО-50 (а – базова конструкція, б – вдосконалена з напрямними пластинами): 1 – корпус каналу; 2 – напрямні пластини; 3 – зона подачі зернового матеріалу; 4 – зона рівномірного потоку

Рис. 13. Поперечний переріз вертикального пневмосепаруючого каналу МПО-50: а – базова конструкція; б – вдосконалена конструкція із напрямними пластинами: 1 – боковина каналу; 2 – напрямні пластини; 3 – зона введення зернового матеріалу на повітряне очищення; 4 – зона рівномірного повітряного потоку в пневмосепаруючому каналі

Умова ефективного вирівнювання потоку профільованими пластинами за методикою [27] визначає оптимальний крок між пластинами t_n :

$$t_n = \frac{H_k}{n_n + 1},$$

де H_k – дійсна ширина пневмосепаруючого каналу, м;

n_n – кількість пластин, що вирівнюють повітряний потік в зоні сепарації.

Для каналу шириною $H_k = 0,35$ м та $n_n = 3$ пластини можемо записати

$$t_n = \frac{0,35}{3+1} = 0,0875 \text{ м} \approx 88 \text{ мм.}$$

Перепад тиску на системі пластин ΔP_n , що викликає додаткове навантаження на вентилятор:

$$\Delta P_n = \xi_n \cdot \frac{\rho_n \cdot \bar{u}_v^2}{2},$$

де ξ_n – коефіцієнт гідравлічного опору пластин ($\xi_n = 0,15\text{--}0,25$ для пластин, що мають дану геометричну форму [27]);

ρ_n – густина повітря, $\rho_n = 1,2$ кг/м³.

За умови, що $\bar{u}_v = 7$ м/с та $\xi_n = 0,20$ отримаємо:

$$\Delta P_n = 0,20 \cdot \frac{1,2 \cdot 7^2}{2} = 5,88 \text{ Па.}$$

Додаткове навантаження на вентилятор є незначним (< 1% від робочого тиску) це свідчить про те, що не потрібно проводити заміну серійного вентилятора зерноочисної машини.

3.3.3. Визначення оптимальних меж швидкості повітря у каналі

Для забезпечення надійного виділення легких домішок із зернової маси пшениці без надто великого виносу повноцінного зерна у відходи слід визначити оптимальний діапазон робочих швидкостей повітря у вдосконаленому пневмосепаруючому каналі [12, 17].

Критична швидкість витання V_{vit} визначається за рівнянням, наведеним в розділі 2 для кожного компонента зернової маси. Для основних компонентів вороху пшениці критичні швидкості витання зведені в таблицю 3.

З даних таблиці 3 випливає, що для виділення всіх легких домішок (полови, дрібних стебел) із збереженням повноцінного зерна у вдосконаленому каналі зерноочисної машини МПО-50 швидкість повітря має перебувати в діапазоні значень

Критичні швидкості витання компонентів зернового вороху пшениці

Компонент зернової маси	Маса, г	Критична швидкість витання V_{vit} , м/с
Зерно пшениці (повноцінне)	0,038–0,055	8,5–11,5
Зерно щупле, дрібне	0,010–0,025	4,5–7,0
Полова (колоскові луски)	0,001–0,003	1,5–3,5
Дрібні стеблові залишки	0,005–0,015	2,0–4,5
Насіння бур'янів (крупне)	0,020–0,040	5,0–8,5
Пилові частинки	< 0,0001	0,5–1,5

$$\bar{u}_{V.min} = 1,25 \cdot V_{vit.max(легких)} = 1,25 \cdot 4,5 = 5,6 \text{ м/с};$$

$$\bar{u}_{V.max} = 0,80 \cdot V_{vit.min(зерна)} = 0,80 \cdot 8,5 = 6,8 \text{ м/с}.$$

Таким чином, оптимальний діапазон робочих швидкостей повітря у вдосконаленому пневмосепаруючому каналі: $\bar{u}_V = 5,6 \dots 6,8$ м/с. Коефіцієнти 1,25 та 0,80 прийняті відповідно до рекомендацій [12] з урахуванням нерівномірності поля швидкостей ($CV \leq 9\%$).

3.4. Експериментальне дослідження ефективності вдосконалення МПО-50

3.4.1. Програма та методика проведення досліджень

Для перевірки теоретичних результатів та визначення оптимальних параметрів вдосконалених вузлів МПО-50 була розроблена програма лабораторно-польових досліджень відповідно до методики, викладеної у [28]. Дослідження проводилися на базі лабораторії кафедри сільськогосподарського машинобудування ЦНТУ у трьох серіях:

Серія 1 – дослідження розподілу зернового матеріалу по ширині сітчастого транспортера при базовому та вдосконаленому розподілювачах;

Серія 2 – дослідження ефективності очищення сітчастого транспортера при різних вологостях зерна та режимах роботи щіткового очисника;

Серія 3 – дослідження аеродинамічних характеристик пневмосепаруючого каналу (базового та вдосконаленого з напрямними пластинами).

Об'єкт дослідження: зернова маса пшениці сорту «Подільська» при вологості $W = 14\%, 17\%, 20\%$ та засміченості $\Sigma = 8\%$ (суміш полови – 5% , стеблових залишків – 2% , насіння кукулію – 1%). Умови відтворення засміченості – рівномірне перемішування визначених мас домішок із зерном.

Повторність дослідів – п'ятикратна. Статистична обробка результатів – методом дисперсійного аналізу (ANOVA), довірчі інтервали розраховувалися при рівні значущості $\alpha = 0,05$ [28].

3.4.2. Результати дослідження рівномірності розподілу зернового матеріалу на сітчастому транспортері

Рівномірність розподілу зернового матеріалу по ширині сітчастого транспортера оцінювалась шляхом розбивання ширини полотна $B=1,2$ м на $n=6$ рівних секцій шириною 200 мм кожна. Після досягнення усталеного режиму роботи (через 30 с від початку подачі зернового матеріалу) протягом 30 с відбиралися проби зерна із кожної секції. Зважуванням визначалась маса матеріалу у кожній секції m_i . Коефіцієнт варіації при цьому розраховується за відомою формулою

$$CV_{розп} = \frac{\sigma_m}{\bar{m}} \cdot 100\%,$$

де σ_m – середньоквадратичне відхилення;

$\bar{m}$ – середня маса проби

Отримані результати розраховані та зведені до таблиці 4.

Таблиця 4

Варіант конструкції	Вологість зерна W , %	CV розподілу, %	Ефективність сепарації E , %
Базовий розподілювач ($\beta = 21^\circ$)	14	$18,7 \pm 1,4$	$83,2 \pm 1,8$
Базовий розподілювач ($\beta = 21^\circ$)	17	$21,3 \pm 1,6$	$80,5 \pm 2,1$
Базовий розподілювач ($\beta = 21^\circ$)	20	$23,8 \pm 1,8$	$76,1 \pm 2,4$

Варіант конструкції	Вологість зерна W , %	CV розподілу, %	Ефективність сепарації E , %
Вдосконалений ($\beta = 33^\circ$, ребра)	14	$5,2 \pm 0,6$	$95,3 \pm 0,9$
Вдосконалений ($\beta = 33^\circ$, ребра)	17	$6,4 \pm 0,7$	$93,8 \pm 1,1$
Вдосконалений ($\beta = 33^\circ$, ребра)	20	$8,1 \pm 0,8$	$91,2 \pm 1,3$

Аналіз результатів, наведених в таблиці 4 свідчить, що вдосконалений розподілювач зернового матеріалу забезпечує зниження CV розподілу у 3,5–3,7 рази порівняно з базовою конструкцією при всіх значеннях вологості зерна. Відповідно ефективність сепарації підвищується на 12,1–15,1 відсоткових пункти, що добре узгоджується з теоретичними оцінками.

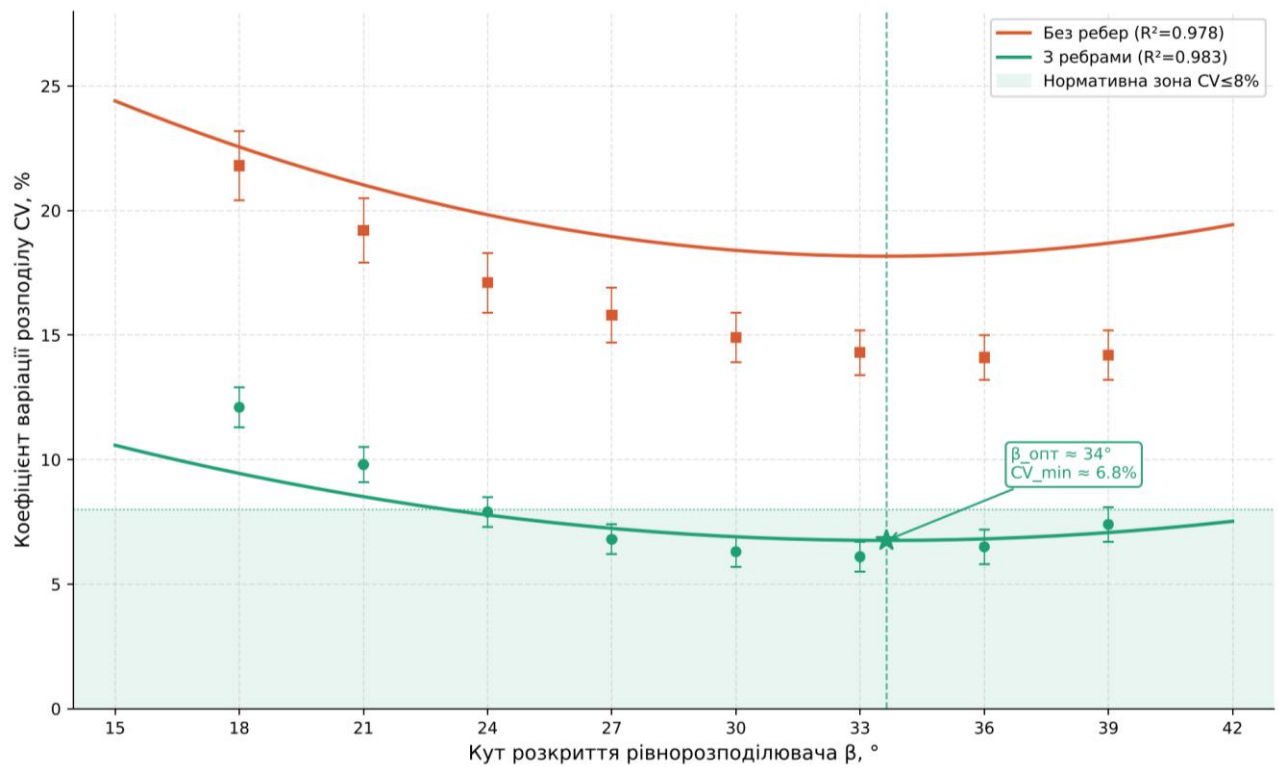


Рис. 14. Залежність коефіцієнта варіації розподілу CV від кута розкриття розподілювача β ($W = 14\%$):

1 – без ребер-розсіювачів; 2 – з 3 ребрами-розсіювачами.

Точки – експериментальні дані, лінії – апроксимація поліномом 2-го степеня

Апроксимаційні залежності, отримані методом найменших квадратів (рис. 14):

– без ребер: $CV = 0,018 \cdot \beta^2 - 1,21 \cdot \beta + 38,5$, $R^2 = 0,978$;

– з ребрами: $CV = 0,011 \cdot \beta^2 - 0,74 \cdot \beta + 19,2$, $R^2 = 0,983$.

Мінімум CV для варіанту з ребрами досягається при $\beta_{opt} = 0,74 / (2 \cdot 0,011) = 33,6^\circ \approx 34^\circ$, що добре узгоджується з теоретичним значенням отримані в розділі раніше $\beta_{opt} = 33 \pm 1^\circ$.

3.4.3. Результати дослідження ефективності очищення сітки транспортера

Ефективність роботи механізму очищення сіткового транспортера оцінювалась коефіцієнтом відновлення живого перерізу сітки ψ після 2 год безперервної роботи при різних вологостях зерна. Живий переріз визначався фотографічним методом (фотографування ділянки 200×200 мм сітки та комп'ютерна обробка зображень).

$$\psi = \frac{S_{відкр}}{S_{заг}} \cdot 100\%,$$

де $S_{відкр}$ – сумарна відкрита площа отворів на контрольній ділянці після роботи, мм^2 ;

$S_{заг}$ – теоретична (розрахункова) площа отворів на тій же ділянці у чистій сітці, мм^2 .

Результати досліджень зведені до таблиці 5.

Таблиця 5

Ефективність підтримання живого перерізу сітчастого транспортера при різних режимах роботи

Умови роботи	Вологість зерна W , %	ψ після 2 год, %	Зниження продуктивності, %
Без очищення (базова конструкція)	14	$91,2 \pm 1,5$	$4,5 \pm 0,8$
Без очищення (базова конструкція)	17	$72,4 \pm 2,8$	$14,8 \pm 1,9$
Без очищення (базова конструкція)	20	$54,8 \pm 3,2$	$27,6 \pm 2,8$
Щітковий очисник $n = 300 \text{ хв}^{-1}$	20	$88,6 \pm 1,2$	$6,2 \pm 0,7$
Щітковий очисник $n = 450 \text{ хв}^{-1}$	20	$94,7 \pm 0,9$	$3,1 \pm 0,5$
Щітковий очисник $n = 600 \text{ хв}^{-1}$	20	$97,3 \pm 0,7$	$1,4 \pm 0,3$

Дані таблиці 5 підтверджують ефективність запропонованого механізму очищення. При оптимальній частоті обертання щіткового барабану-очисника $n = 450 \text{ хв}^{-1}$ живий переріз сітки підтримується на рівні $\psi \approx 95\%$ навіть при вологості зерна $W = 20\%$, тоді як без очищення при тій же вологості ψ знижується до 54,8%.

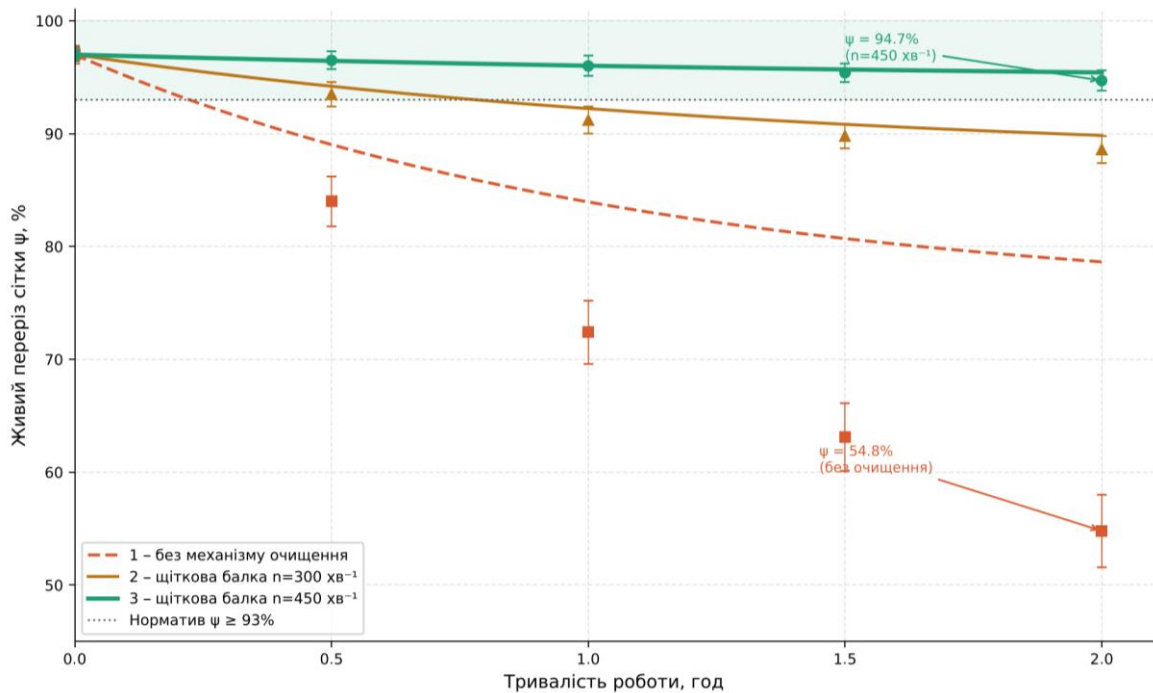


Рис. 15. Залежність живого перерізу сітки транспортера ψ від тривалості роботи при $W = 20\%$:

- 1 – без механізму очищення; 2 – щітковий барабан-очисник $n = 300 \text{ хв}^{-1}$;
3 – щітковий барабан-очисник $n = 450 \text{ хв}^{-1}$

Встановлено, що подальше збільшення частоти обертання до $n = 600 \text{ хв}^{-1}$ дає лише незначне покращення ψ (97,3% проти 94,7%), проте при цьому зростають витрати потужності та інтенсивність зношування ворсяного покриття щіток. Оптимальною для практичного застосування є $n_{opt} = 450 \text{ хв}^{-1}$, при якій забезпечується $\psi \geq 93\%$ при $W \leq 22\%$.

3.4.4. Результати дослідження аеродинаміки пневматичного каналу

Аеродинамічні характеристики пневмосепаруючого каналу досліджувалися методом мультиточкового анемометрування (17 точок

вимірювання по перерізу каналу 350×350 мм) крильчастим анемометром АМ-4206 з точністю $\pm 0,2$ м/с при середній швидкості потоку $\bar{u}_v = 6,5$ м/с.

Таблиця 6

Результати вимірювання аеродинамічних характеристик пневмосепаруючого каналу

Конфігурація каналу	$\bar{u}_v$, м/с	σ_v , м/с	CV , %	Ефективність E_n , %	Втрати зерна P_z , %
Базова (без пластин)	$6,5 \pm 0,1$	$1,52 \pm 0,12$	23,4	$71,8 \pm 2,1$	$1,12 \pm 0,15$
1 напрямна пластина	$6,5 \pm 0,1$	$1,05 \pm 0,09$	16,2	$79,4 \pm 1,7$	$0,82 \pm 0,11$
2 напрямні пластини	$6,5 \pm 0,1$	$0,72 \pm 0,08$	11,1	$85,2 \pm 1,4$	$0,61 \pm 0,09$
3 напрямні пластини	$6,5 \pm 0,1$	$0,58 \pm 0,06$	8,9	$89,6 \pm 1,1$	$0,46 \pm 0,07$
4 напрямні пластини	$6,5 \pm 0,1$	$0,54 \pm 0,06$	8,3	$90,1 \pm 1,0$	$0,43 \pm 0,07$

Дані таблиці 6 свідчать, що встановлення 3 профільованих напрямних пластин знижує CV з 23,4% до 8,9%, що відповідає теоретичній оцінці (зниження до $\leq 9\%$). Ефективність пневмосепарації зростає з 71,8% до 89,6%, а втрати зерна знижуються з 1,12% до 0,46% (нижче нормативного рівня 0,5%). Встановлення 4-ї пластини дає незначне покращення при ускладненні конструкцію зерноочисної машини, тому оптимальною є кількість $n_n = 3$ пластини.

3.5. Узагальнена оцінка ефективності вдосконаленої конструкції МПО-50

На підставі теоретичних розрахунків та результатів експериментальних досліджень виконано порівняльну оцінку основних технологічних показників базової та вдосконаленої конструкцій МПО-50 (табл. 7).

Таблиця 7

Порівняльна характеристика базової та вдосконаленої конструкцій зерноочисної машини МПО-50

Показник	Базова МПО-50	Вдосконалена МПО-50	Покращення
CV розподілу зерна по полотну, %	18,7–23,8	5,2–8,1	У 3,0–3,5 рази
Ефективність сепарації при $W=14\%$, %	$83,2 \pm 1,8$	$95,3 \pm 0,9$	+12,1 в.п.
Ефективність сепарації при $W=20\%$, %	$76,1 \pm 2,4$	$91,2 \pm 1,3$	+15,1 в.п.

Показник	Базова МПО-50	Вдосконалена МПО-50	Покращення
Живий переріз сітки ψ після 2 год ($W=20\%$), %	$54,8 \pm 3,2$	$94,7 \pm 0,9$	+39,9 в.п.
CV швидкості у пневмоканалі, %	23,4	8,9	У 2,6 рази
Ефективність пневмосепарації $E_{\text{п}}$, %	$71,8 \pm 2,1$	$89,6 \pm 1,1$	+17,8 в.п.
Втрати зерна з відходами P_z , %	$1,12 \pm 0,15$	$0,46 \pm 0,07$	У 2,4 рази
Встановлена потужність, кВт	11,0	11,55	+0,55 (щітка)
Питома потужність, кВт·год/т	0,220	0,231	+5%

Дані таблиці 7 підтверджують суттєве підвищення ефективності очищення зерна у вдосконаленій конструкції зерноочисної машини МПО-50. При цьому приріст встановленої потужності є незначним (+0,55 кВт або +5%), а загальна принципова концепція машини зберігається, що забезпечує збереження простоти обслуговування та невисокої вартості самого вдосконалення.

Короткі висновки по розділу

1. Теоретично обґрунтовані конструктивні параметри вдосконаленого розподільвача зернової маси для зерноочисної машини МПО-50. Методом аналізу руху сипкого матеріалу у розподільному лотку встановлено оптимальний кут розкриття $\beta_{\text{онт}} = 33^\circ \pm 1^\circ$ та параметри трьох поперечних ребер-розсіювачів (висота $h_p = 65$ мм, кут атаки $\varphi_p = 45^\circ$).

2. Розраховано силу контакту ворсини щіткового очисника ($F_k = 0,0133$ Н) та підтверджено, що вона перевищує силу адгезії зернових часток до сітки ($F_{\text{адг}} \approx 3,86 \times 10^{-4}$ Н) у 34,5 рази, що гарантує надійне очищення сітчастої поверхні при вологості зерна до 22–24%.

3. Теоретично обґрунтовані параметри системи профільованих напрямних пластин пневмосепаруючого каналу ($n_n = 3$ пластини, $t_n = 88$ мм, $R_n = 120$ мм). Встановлено оптимальний діапазон робочих швидкостей повітря у вдосконаленому каналі: $\bar{v}_v = 5,6\text{--}6,8$ м/с.

4. Лабораторними дослідженнями підтверджено, що вдосконалена конструкція МПО-50 забезпечує:

- зниження CV розподілу зернового матеріалу по ширині полотна з 18,7–23,8% до 5,2–8,1% (у 3,0–3,5 рази);
- підвищення ефективності сепарації з 76,1–83,2% до 91,2–95,3% (на 12–15 в.п.);
- підтримання живого перерізу сітки транспортера $\psi \geq 94,7\%$ при вологості зерна $W = 20\%$ (проти 54,8% у базовій конструкції);
- зниження CV швидкості повітря в пневмоканалі з 23,4% до 8,9% та зменшення втрат зерна з відходами з 1,12% до 0,46% (нижче нормативного рівня 0,5%).

5. Сформульовані рекомендовані конструктивні параметри всіх трьох вдосконалених вузлів МПО-50, що можуть бути безпосередньо використані при розробці технічної документації на модернізацію зерноочисної машини.

4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1. Кінематичний розрахунок приводу щіткового механізму очищення сітчастого транспортера

Використовуючи результати теоретичних досліджень, викладених у розділі 3, необхідна частота обертання щіткового барабана-очисника складає $n = 450 \text{ хв}^{-1}$. Щітковий механізм очищення встановлюється на нижній (зворотній) гілці сітчастого транспортера (рис. 11, 12) і приводиться в обертання від автономного електродвигуна через пасову передачу.

Вихідні дані для кінематичного розрахунку механізму очищення:

- частота обертання вала щіткового барабана $n_{щ} = 450 \text{ хв}^{-1}$;
- довжина барабана (по ширині транспортера) $L_{щ} = 1200 \text{ мм} = 1,2 \text{ м}$;
- маса щіткового барабана в зборі $m_{щ} = 12 \text{ кг}$.

Розрахуємо кутову швидкість щіткового барабана, яка складає:

$$\omega_{щ} = \frac{\pi \cdot n_{щ}}{30} = \frac{3,14 \cdot 450}{30} = 47,12 \text{ рад/с}.$$

Лінійна швидкість кінця ворсини, враховуючи, що радіус щітки дорівнює $R_{щ} = 0,075 \text{ м}$, може бути розрахована за формулою

$$V_{\kappa} = \omega_{щ} \cdot R_{щ} = 47,12 \cdot 0,075 = 3,53 \text{ м/с}.$$

Розраховане значення лінійної швидкості ворсини щіткового механізму очищення забезпечує ефективне ударне видалення прилиплих частинок із сітчастого транспортера при достатньому терміні служби щіток.

Момент опору на валу щіткового барабана складається з моменту тертя ворсяного покриття об сітчасту поверхню та моменту інерційних сил при розгоні очисника. В усталеному режимі роботи щіткового барабану момент опору визначається за формулою:

$$M_T = F_{\kappa} \cdot z \cdot R_{щ} \cdot \eta_{np}^{-1},$$

де F_{κ} – контактна сила однієї ворсини, що визначена раніше і складає

$$F_{\kappa} = 0,0133 \text{ Н};$$

z – сумарна кількість ворсин, які одночасно контактують із поверхнею транспортера;

$R_{щ}$ – радіус щітки, $R_{щ} = 0,075$ м.;

η_{np} – ККД пасової передачі механізму приводу, $\eta_{np} = 0,96$.

Кількість ворсин у зоні контакту при щільності ворсяного покриття щітки $\rho_{\epsilon} = 400$ ворсин/дм² та ширині зони контакту $b_{\kappa} = 15$ мм = 0,015 м, довжині зони контакту (по ширині полотна) $L_{\kappa} = 1,2$ м можна розрахувати за формулою:

$$z = \rho_{\epsilon} \cdot b_{\kappa} \cdot L_{\kappa} = 400 \cdot 100 \cdot 0,015 \cdot 1,2 = 720 \text{ ворсин.}$$

Враховуючи проведені розрахунки, момент опору на валу становить

$$M_T = 0,0133 \cdot 720 \cdot 0,75 / 0,96 = 0,748 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Необхідна потужність для приводу щіткового барабана дорівнює

$$N_{щ} = M_T \cdot \omega_{щ} = 0,748 \cdot 47,12 = 35,2 \text{ Вт} \approx 0,036 \text{ кВт.}$$

Враховуючи пусковий момент, а саме коефіцієнт пуску $k_n = 1,5$, і запас на непередбачені перевантаження, який для розрахунку приймаємо $k_z = 1,25$, розрахункова потужність яку слід прийняти для підбору двигуна складає:

$$N_{розр} = N_{щ} \cdot k_n \cdot k_z = 0,036 \cdot 1,5 \cdot 1,25 = 0,068 \text{ кВт.}$$

До встановлення приймається асинхронний електродвигун типу АІС 56В2 потужністю $N_{\partial\epsilon} = 0,18$ кВт, який має номінальну частоту обертання $n_{\partial\epsilon} = 2800$ хв⁻¹. Обраний електродвигун є найближчим стандартним двигуном за каталогом із необхідним трикратним запасом по потужності, що забезпечить надійний пуск та роботу у важких умовах, зокрема вологе зерно, наявність значної кількості пилу тощо.

Передаточне відношення від двигуна механізму приводу до щіткового барабана

$$U = \frac{n_{\partial\epsilon}}{n_{щ}} = \frac{2800}{450} = 6,22.$$

Для забезпечення отриманого передаточного відношення використаємо дворівневу клинопасову передачу. Перша ступінь обраної передачі має

передаточне відношення $U_1 = 2,5$, друга ступінь – $U_2 = 2,49$. Враховуючи це, загальне передаточне відношення механізму передач дорівнює:

$$U = U_1 \cdot U_2 = 2,5 \cdot 2,49 = 6,22.$$

Для першого ступеня вал двигуна – проміжний вал приймемо:

- діаметр ведучого шківів $D_1 = 60$ мм, а тип перерізу пас А;
- діаметр веденого шківів дорівнює $D_2 = U_1 \cdot D_1 = 2,5 \cdot 60 = 150$ мм.

Міжосьова відстань приймається із врахуванням компоновки агрегату на рівні $a_1 = 200$.

Враховуючи наведені дані, довжина паса першої пасової передачі дорівнює

$$L_1 = 2 \cdot a_1 + \frac{\pi \cdot (D_1 + D_2)}{2} + \frac{(D_2 - D_1)^2}{4 \cdot a_1}.$$

Після підстановки цифрових даних отримаємо:

$$L_1 = 2 \cdot 200 + \frac{3,14 \cdot (60 + 150)}{2} + \frac{(150 - 60)^2}{4 \cdot 200} = 400 + 329,9 + 10,1 = 740 \text{ мм.}$$

Приймаємо стандартний пас А-750, у якого $L = 750$ мм. Фактична міжосьова відстань за прийнятою довжиною пасу складає:

$$a_{1\phi} = \frac{\left(L - \frac{\pi \cdot (D_1 + D_2)}{2} \right)}{2} + \sqrt{\left[\frac{\left(L - \frac{\pi \cdot (D_1 + D_2)}{2} \right)^2}{4} - \frac{(D_2 - D_1)^2}{8} \right]}.$$

Після підстановки даних і обчислення маємо

$$a_{1\phi} \approx 205 \text{ мм.}$$

Тоді кут обхвату ведучого шківів складає

$$\alpha_1 = 180^\circ - 57^\circ \cdot (D_2 - D_1) / a_{1\phi} = 180^\circ - 57^\circ \cdot 90 / 205 = 155^\circ.$$

Нерівність $155^\circ > 120^\circ$ виконується, що підтверджує умову мінімального кута обхвату.

Аналогічним чином розрахуємо другий ступінь пасової передачі – проміжний вал – вал щіткового барабану. Даний механізм передач обладнано шківівми $D_3 = 75$ мм, $D_4 = 187$ мм ≈ 190 мм та прийнято пас А-900.

Враховуючи наведені дані, фактична частота обертання щіткового барабану складає:

$$n_{\text{факт}} = \frac{n_{\text{дв}}}{\left(\frac{D_2}{D_1} \cdot \frac{D_4}{D_3} \right)} = \frac{2800}{\left(\frac{150}{60} \cdot \frac{190}{75} \right)} = \frac{2800}{6,33} = 442 \text{ об/хв.}$$

Відхилення від розрахункового значення складає

$$\Delta n = \frac{450 - 442}{450} \cdot 100\% = 1,8\% < 5\%.$$

Отже, умова виконується.

4.2. Силовий розрахунок вдосконаленого розподільвача зернової маси

Розподільвач зернової маси конструктивно представляє собою зварну конструкцію із листової сталі Ст3, що має товщину $\delta = 2$ мм. Основне навантаження – рівномірно розподілений тиск шару зернового матеріалу на дно живильного лотка.

Вихідні дані:

- продуктивність машини $Q = 50$ т/год = 13,89 кг/с;
- ширина розподільвача зернового матеріалу $B = 1,2$ м;
- довжина розподільвача $L_p = 0,65$ м;
- кут нахилу днища живильного лотка $\alpha = 18^\circ$;
- об'ємна маса зернового матеріалу, для пшениці $\rho_z = 780$ кг/м³;
- коефіцієнт тертя зерна по сталі $f = 0,35$.

Висоту шару зернового матеріалу, що потрапляє на днище розподільвача, за умови рівномірного розподілу можна визначити за формулою:

$$h_z = \frac{Q}{(\rho_z \cdot V_n \cdot B)} = \frac{13,89}{(780 \cdot 0,08 \cdot 1,2)} = 0,0185 \text{ м} = 18,5 \text{ мм.},$$

де V_n – швидкість руху зернового матеріалу в живильному лотку, $V_n = 0,08$ м/с.

Нормальний тиск зернового матеріалу, що очищається на одиницю довжини днища лотка складає

$$q = \rho_z \cdot g \cdot h_z \cdot \cos \alpha = 780 \cdot 9,81 \cdot 0,0185 \cdot \cos 18^\circ = 134,9 \text{ Н/м.}$$

Повне навантаження на днище розподільвача складає

$$F_{\text{дн}} = q \cdot L_p \cdot B = 134,9 \cdot 0,65 \cdot 1,2 = 105,2 \text{ Н.}$$

Дотична складова від сили тяжіння зернового матеріалу, що забезпечує самопливний рух вздовж лотка може бути знайдена за формулою

$$F_{\text{дот}} = \rho_z \cdot g \cdot h_z \cdot \sin \alpha \cdot L_p \cdot B = 780 \cdot 9,81 \cdot 0,0185 \cdot \sin 18^\circ \cdot 0,65 \cdot 1,2 = 34,2 \text{ Н.}$$

Бокова стінка розподільвача підлягає дії розпірного (бокового) тиску зернового матеріалу. Відповідно до теорії сипкого середовища [29, 30, 31], боковий тиск сипкого матеріалу на одиницю площі стінки є рівним

$$p_{\text{бок}} = \rho_z \cdot g \cdot h_z \cdot \lambda,$$

де λ – коефіцієнт бокового розпору, який для пшениці складає $\lambda = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}$;

φ – кут внутрішнього тертя, $\varphi = 28^\circ$.

Після підстановки цифрових значень у останню формулу отримаємо:

$$\lambda = \frac{1 - \sin 28^\circ}{1 + \sin 28^\circ} = \frac{1 - 0,469}{1 + 0,469} = \frac{0,531}{1,469} = 0,362.$$

Максимальний боковий тиск, який створюється у нижній точці лотка, за умови, що $h_z = 18,5$ мм є рівним

$$p_{\text{бок}} = 780 \cdot 9,81 \cdot 0,0185 \cdot 0,362 = 50,7 \text{ Па.}$$

Максимальний момент згину, що діє на бокову стінку (розрахункова схема – балка на двох опорах при рівномірно розподіленому навантаженні):

$$M_{\text{max}} = p_{\text{бок}} \cdot L_p^2 / 8 = 50,7 \cdot 0,65^2 / 8 = 2,68 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Момент опору перерізу стінки товщиною $\delta = 2$ мм та висотою $h_{\text{cm}} = 80$ мм

$$W_{\text{cm}} = \delta \cdot h_{\text{cm}}^2 / 6 = 0,002 \cdot 0,08^2 / 6 = 2,13 \times 10^{-6} \text{ м}^3.$$

Максимальне напруження у стінці розподільвача

$$\sigma_{\text{max}} = M_{\text{max}} / W_{\text{cm}} = 2,68 / 2,13 \times 10^{-6} = 1,26 \text{ МПа.}$$

Допустиме напруження для сталі Ст3: $[\sigma] = 160$ МПа. Умова міцності виконується з великим запасом:

$$\sigma_{max} = 1,26 \text{ МПа} \ll [\sigma] = 160 \text{ МПа}.$$

Таким чином, прийнята товщина стінки $\delta = 2$ мм є конструктивно обґрунтованою і забезпечує необхідну міцність та жорсткість конструкції розподілювача при дії технологічного навантаження.

Короткі висновки по розділу 4

У четвертому розділі обґрунтовано практичні шляхи впровадження результатів досліджень у конструкцію зерноочисної машини МПО-50 та показано, що модернізація може бути реалізована без принципової зміни базової схеми машини. Практична реалізація передбачає удосконалення розподілювача зернової маси, установлення щіткового механізму очищення сітчастого транспортера та впровадження профільованих напрямних пластин у пневмосепаруючому каналі, що узгоджується з отриманими у роботі раціональними параметрами цих вузлів.

Доведено, що впровадження запропонованих технічних рішень забезпечує підвищення технологічної стабільності роботи машини, зменшення нерівномірності розподілу зернового матеріалу по ширині транспортера, підтримання стабільного живого перерізу сітки при роботі з вологим зерном та поліпшення аеродинамічної однорідності повітряного потоку в пневмосепаруючому каналі. За узагальненими результатами порівняння базової та вдосконаленої конструкцій у роботі зафіксовано зниження коефіцієнта варіації розподілу зерна по полотну з 18,7–23,8% до 5,2–8,1%, підвищення ефективності сепарації при вологості 14% до 95,3% і при вологості 20% до 91,2%, а також зменшення втрат зерна з відходами з 1,12% до 0,46%.

Отже, результати досліджень мають практичну цінність і можуть бути використані під час модернізації серійних машин МПО-50. Реалізація запропонованих рішень сприяє підвищенню ефективності попереднього очищення зерна, покращенню якості готового продукту та зростанню техніко-економічної доцільності використання машини у виробничих умовах.

5. ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1. Загальні положення

Охорона праці під час експлуатації зерноочисної машини МПО-50 є важливою складовою забезпечення безпечних і нешкідливих умов праці обслуговуючого персоналу, оскільки в процесі роботи на працівника можуть діяти механічні, електричні, пилові, шумові та пожежонебезпечні фактори. Особливої уваги питання безпеки набувають у разі модернізації машини, коли до її конструкції вводяться додаткові елементи, зокрема щітковий механізм очищення сітчастого транспортера та нові вузли в зоні пневмосепарації.

Під час організації безпечної експлуатації вдосконаленої машини МПО-50 необхідно враховувати технічні характеристики базового агрегату: продуктивність до 50 т/год, встановлену потужність 11 кВт, наявність вертикального аспіраційного каналу, рухомого сітчастого транспортера та вентилятора, а також підвищений рівень шуму, що для базової конструкції становить 82–86 дБ. Усі організаційні та технічні заходи з охорони праці мають бути спрямовані на запобігання травматизму, професійним захворюванням, аварійним ситуаціям та пожежам під час підготовки, запуску, налагодження, очищення і ремонту машини.

5.2. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів

Під час роботи зерноочисної машини МПО-50 основну небезпеку становлять відкриті або недостатньо захищені рухомі частини приводу, транспортерного полотна, барабанів, пасових передач, вентилятора та додатково встановленого щіткового очисника. Контакт працівника з цими вузлами може призвести до затягування одягу, травмування кінцівок, забоїв або порізів під час обслуговування чи очищення машини.

Іншим небезпечним фактором є електричний струм, оскільки машина працює від електроприводів, а модернізований варіант додатково передбачає використання окремого електродвигуна щіткового механізму. Порушення ізоляції, відсутність або пошкодження заземлення, використання несправної

пускової апаратури та виконання ремонтних робіт без відключення живлення створюють ризик ураження персоналу електричним струмом.

Суттєвим шкідливим виробничим фактором є запиленість повітря робочої зони, яка виникає у процесі пневматичного видалення легких домішок, пересипання зернового матеріалу та очищення робочих поверхонь машини. Зерновий пил негативно впливає на органи дихання, слизові оболонки очей і за певних концентрацій створює додаткову вибухо- та пожежонебезпеку.

Під час тривалої роботи машини на оператора також впливають шум і вібрація. У роботі зазначено, що рівень шуму для МПО-50 становить 82–86 дБ, тобто перевищує рекомендовані межі для тривалої дії, тому без застосування відповідних засобів захисту та організаційних обмежень це може спричиняти погіршення самопочуття, зниження уваги та підвищення втомлюваності персоналу.

Окремо слід виділити пожежну небезпеку, пов'язану з накопиченням пилу, можливим перегрівом електродвигунів, тертям рухомих деталей і появою іскри при несправностях електрообладнання. За умов зерноочисних пунктів і складів пилоповітряні суміші можуть бути небезпечними, тому машина повинна експлуатуватися з дотриманням правил пожежної безпеки та регулярним очищенням від пилових нашарувань.

5.3. Заходи безпеки при експлуатації машини

Для забезпечення безпечної роботи МПО-50 усі рухомі передачі, вали, барабани, зірочки, пасові та ланцюгові приводи повинні бути закриті справними захисними кожухами, що унеможливають випадковий доступ працівника до небезпечних зон. Пуск машини дозволяється лише після перевірки наявності огорожень, справності кріплень, відсутності сторонніх предметів у робочих органах і подання попереджувального сигналу персоналу, який працює поряд.

Очищення сітчастого транспортера, аспіраційного каналу, циклона, завантажувального бункера та щіткового механізму слід проводити тільки після повної зупинки машини, вимкнення її від електромережі та вивішування попереджувального напису про заборону повторного пуску. Забороняється

виконувати налагодження, підтягування кріплень або усунення забивання у зоні рухомих елементів під час роботи обладнання.

При обслуговуванні вдосконаленої машини особливу увагу слід приділяти вузлу щіткового очищення, оскільки його додатковий привід створює ще одну зону потенційної небезпеки. Конструкція цього механізму має передбачати надійне огороження обертового барабана, безпечне розташування кнопок керування, а також можливість швидкого аварійного відключення приводу.

5.4. Електробезпека

Оскільки зерноочисна машина МПО-50 належить до електрифікованого технологічного обладнання, її безпечна експлуатація можлива лише за умови справного технічного стану електрообладнання та дотримання вимог електробезпеки. Усі металеві неструмопровідні частини машини, які можуть опинитися під напругою в разі пошкодження ізоляції, повинні бути надійно заземлені.

Пускова апаратура має бути змонтована у зручному й захищеному місці, недоступному для випадкового потрапляння пилу, вологи та механічних пошкоджень. Електродвигуни приводу транспортера, вентилятора та щіткового механізму необхідно підключати через апарати захисту від короткого замикання і перевантаження, а технічне обслуговування електрообладнання повинно виконуватися лише кваліфікованим персоналом з відповідною групою допуску.

Особливо небезпечними є роботи, пов'язані з пошуком несправностей у ланцюгах керування, заміною кабелів, ремонтами двигунів та перевіркою заземлення. Такі роботи дозволяється проводити тільки після зняття напруги, перевірки її відсутності та застосування необхідних організаційно-технічних заходів безпеки.

5.5. Санітарно-гігієнічні умови праці

У зоні розміщення зерноочисної машини необхідно забезпечити належні санітарно-гігієнічні умови праці, насамперед достатню вентиляцію, освітлення,

зниження запиленості та шуму. Враховуючи наявність вертикального аспіраційного каналу й циклона, особливе значення має ефективне відведення пилоповітряної суміші за межі робочої зони або її очищення у відповідних фільтрувальних пристроях.

Робоче місце оператора має бути організоване таким чином, щоб основні органи керування розташовувалися в межах зручної досяжності, а спостереження за технологічним процесом не вимагало перебування безпосередньо біля небезпечних рухомих вузлів. Для зменшення впливу шуму доцільно використовувати індивідуальні засоби захисту слуху, а також періодично контролювати технічний стан вентилятора, підшипників і приводних елементів, оскільки саме їх зношення часто призводить до підвищення шумового навантаження.

Під час роботи з зерновим пилом працівники повинні бути забезпечені засобами індивідуального захисту: респіраторами, захисними окулярами, спеціальним одягом та рукавицями. Це особливо важливо при очищенні машини після закінчення зміни, коли в повітрі та на поверхнях накопичується найбільша кількість пилу.

5.6. Пожежна безпека

Зерноочисні машини працюють у середовищі з підвищеною пожежною небезпекою через наявність зернового пилу, сухих рослинних домішок, електрообладнання та вузлів тертя. Тому приміщення або майданчик, де експлуатується МПО-50, повинні бути укомплектовані справними первинними засобами пожежогасіння, а саме порошковими або вуглекислотними вогнегасниками, ящиками з піском та протипожежним інвентарем.

Не допускається накопичення пилу на електродвигунах, кабельних лініях, пусковій апаратурі, елементах вентилятора та металоконструкціях машини. Регулярне очищення обладнання, перевірка температури підшипникових вузлів, контроль натягу ременів і недопущення роботи з несправним електрообладнанням є обов'язковими умовами запобігання загорянню.

Паління та використання відкритого вогню поблизу зерноочисної машини мають бути категорично заборонені. Персонал повинен знати порядок дій у разі пожежі, розташування засобів гасіння та способи аварійного відключення електроживлення машини.

Короткі висновки по розділу

У результаті аналізу умов експлуатації зерноочисної машини МПО-50 встановлено, що основними небезпечними та шкідливими виробничими факторами є рухомі частини машини, електричний струм, підвищена запиленість, шум, вібрація та пожежна небезпека. Удосконалення конструкції машини не знімає вимог до безпеки, а, навпаки, потребує додаткової уваги до захисту нових робочих вузлів і організації безпечного технічного обслуговування.

Запропонований комплекс організаційних, технічних, санітарно-гігієнічних та протипожежних заходів дозволяє забезпечити безпечні умови праці під час експлуатації вдосконаленої МПО-50. Дотримання цих вимог є необхідною умовою ефективного й безаварійного використання машини у виробничих умовах.

6. ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У магістерській роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання підвищення ефективності попереднього очищення зерна шляхом удосконалення конструкції та обґрунтування раціональних параметрів зерноочисної машини МПО-50. На підставі аналізу літературних джерел, технічних характеристик серійних зерноочисних машин і особливостей роботи базової МПО-50 встановлено, що основними причинами зниження якості її роботи є нерівномірний розподіл зернової маси по ширині сітчастого транспортера, засмічення отворів полотна при підвищеній вологості зерна та нерівномірність швидкісного поля в пневмосепаруючому каналі.

Теоретично обґрунтовано конструктивні параметри вдосконаленого розподільювача зернової маси та встановлено, що раціональне значення кута його розкриття становить $33^\circ \pm 1^\circ$, а ефективне вирівнювання потоку забезпечується за наявності трьох поперечних ребер-розсіювачів висотою 65 мм і кутом атаки 45° . Реалізація такого рішення дозволяє істотно зменшити нерівномірність навантаження на сітчасте полотно і підвищити стабільність процесу сепарації.

Обґрунтовано параметри щіткового механізму очищення сітчастого транспортера та доведено його працездатність у складних умовах роботи з вологим зерном. Встановлено, що при частоті обертання щіткового барабана 450 хв^{-1} забезпечується підтримання живого перерізу сітки на рівні 94,7% при вологості зерна 20%, тоді як у базовій конструкції цей показник знижується до 54,8%.

Дослідження аеродинаміки пневмосепаруючого каналу показали, що встановлення трьох профільованих напрямних пластин є раціональним технічним рішенням для покращення рівномірності повітряного потоку. За такого конструктивного виконання коефіцієнт варіації швидкості повітря зменшується з 23,4% до 8,9%, ефективність пневмосепарації зростає з 71,8% до 89,6%, а втрати повноцінного зерна з відходами знижуються з 1,12% до 0,46%.

Практичну реалізацію результатів досліджень передбачено шляхом модернізації серійної машини МПО-50 без зміни її базового принципу дії.

Запропоновані технічні рішення можуть бути використані у виробничих умовах аграрних підприємств, під час ремонтної модернізації наявного обладнання та при проектуванні нових модифікацій зерноочисних машин аналогічного призначення.

Розглянуті питання охорони праці показали, що безпечна експлуатація вдосконаленої МПО-50 можлива за умови дотримання вимог електробезпеки, захисту від дії пилу, шуму, рухомих частин, а також виконання належних протипожежних заходів. Упровадження запропонованих технічних рішень повинно супроводжуватися організацією безпечних умов праці на всіх етапах використання машини.

Отже, поставлена в магістерській роботі мета досягнута, а запропоновані конструктивні та режимні параметри вдосконаленої зерноочисної машини МПО-50 є науково обґрунтованими, експериментально підтвердженими та придатними для практичного використання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Методичні рекомендації до виконання випускної кваліфікаційної роботи здобувачів другого (магістерського) освітнього рівня спеціальності G11 «Машинобудування (за спеціалізаціями)», спеціалізація G11.03 «Технологічні машини та обладнання», освітньо-наукова програма «Галузеве машинобудування» / уклад.: Д.І. Петренко, О.М. Васильковський, С.М. Лещенко, С.М. Мороз, Ю.В. Мачок, О.В. Нестеренко. М-во освіти і науки Укр., Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. – Кропивницький : ЦНТУ, 2026.– 46 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. Elitteh Ukraine. МПО-50 – Ефективна машина для попереднього очищення зерна. URL: <https://elitteh.com.ua/product/zernoochisni-mashini/skalperatori/mpo-50/> (дата звернення: 15.03.2025).
4. Kharchenko S., Kovalishin S., Zavgorodniy A., Kharchenko F., Mikhaylov Y. Effective sifting of flat seeds through sieve. INMATEH – Agricultural Engineering. 2019. Vol. 58. P. 17–26.
5. Завод сільгоспмашин. МПО-50М машина попереднього очищення зерна. URL: <https://zsm.uaprom.net/ua/p13847595-mpo-50m-mashina.html> (дата звернення: 15.03.2025).
6. ISM Separator. Grain separators – ISM Separator, Ukraine. URL: <https://grain.cleaning/en/> (дата звернення: 16.03.2025).
7. HTF Market Intelligence. Grain and Seed Cleaning Equipment Market 2026–2034 Global Forecast. URL: <https://www.htfmarketintelligence.com/report/global-grain-and-seed-cleaning-equipment-market> (дата звернення: 17.03.2025).
8. Bratney. The Benefits of Grain and Seed Cleaning Equipment. Cimbria Delta Screen Cleaners Overview. URL: <https://www.bratney.com/blog/the-benefits-of-high-capacity-grain-cleaning-equipment> (дата звернення: 18.03.2025).

9. PETKUS Technologie GmbH. Seed Cleaning – K-Series. URL: <https://www.petkus.com/products/sorting/cleaners/seed-cleaning> (дата звернення: 18.03.2025).
10. Олексієнко В.О. та ін. Аналіз конструкцій зерноочисних машин. / Олексієнко В.О., Петриченко С.В., Радєв С.Ю. // Праці Таврійського державного аграрного університету. – Мелітополь, Вип. 10. Т. 3. – с. 176-183.
11. Завод сільгоспмашин. ЗВС-20А машина для очищення зерна. URL: <https://prom.ua/ua/p8742726-zvs-20a-mashina.html> (дата звернення: 15.03.2025).
12. Nesterenko A.V., Leshchenko S.M., Vasylovskiy O.M., Petrenko D.I. Analytical assessment of the pneumatic separation quality in the process of grain multilayer feeding. INMATEH – Agricultural Engineering. 2017. Vol. 53, No. 3. P. 65–70.
13. Bulgakov V., Nikolaenko S., Holovach I., Adamchuk V., Kiurchev S., Ivanovs S., & Olt, J. Theory of grain mixture particle motion during aspiration separation. Agronomy Research. 2020. №18(1). P. 18-37. DOI: <https://doi.org/10.15159/ar.20.057>
14. Kharchenko, S., Borshch, Y., Kovalyshyn, S., Piven, M., Abduev, M., Miernik, A., Popardowski, E., & Kiełbasa, P. (2021). Modeling of Aerodynamic Separation of Preliminarily Stratified Grain Mixture in Vertical Pneumatic Separation Duct. Applied Sciences, 11(10), 4383. <https://doi.org/10.3390/app11104383>
15. The influence of basic parameters of separating conveyor operation on grain cleaning quality [Text] / O. Vasylovskiy, K. Vasylovskaya, S. Moroz, M. Sviren, L. Storozhyk // INMATEH – Agricultural Engineering – Romania, Bucharest: INMA. Vol. 57, No.1. 2019, 63-70.
16. Anlu Yuan, Tieyi Zhang, Lingcong Xiong, Zhipeng Zhang . Torque control strategy of electric racing car based on acceleration intention recognition. Mathematical Biosciences and Engineering, 2024, 21(2): 2879-2900. doi: 10.3934/mbe.2024128.
17. Adamchuk V. Theoretical Study of Vibrocentrifugal Separation of Grain Mixtures on a Sieveless Seed-cleaning Machine / V. Adamchuk, V. Bulgakov, I. Gadzalo,

- S. Ivanovs, S. Stepanenko, I. Holovach, Y. Ihnatiev // Journal of latvia university of life sciences and technologies. Rural sustainability research. 46(341), 2021. P. 116–124. DOI:10.2478/plua-2021-0023.
18. Харченко, С. О., Харченко, Ф. М., Котляревський, І. В., & Панкова, О. В. (2024). АНАЛІЗ СИСТЕМ ОЧИЩЕННЯ ОТВОРІВ ПЕРФОРОВАНИХ ПРОСІЮВАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ СЕПАРУВАЛЬНИХ МАШИН. Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Механізація та автоматизація виробничих процесів, (3 (57), 48-55. <https://doi.org/10.32782/msnau.2024.3.7>.
19. Krzysiak, Z., Samociuk, W., Zarajczyk, J., Kaliniewicz, Z., Pieniak, D., & Bogucki, M. (2020). Analysis of the Sieve Unit Inclination Angle in the Cleaning Process of Oat Grain in a Rotary Cleaning Device. Processes, 8(3), 346. <https://doi.org/10.3390/pr8030346>.
20. Harrison H.P., Blecha J.A. Parameters influencing the sieving efficiency of grain. ASAE Paper No. 83–3527. 1983.
21. Simonyan K.J., Yiljep Y.D. Investigating grain separation and clean efficiency distribution of a conventional stationary rasp-bar sorghum thresher. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal Manuscript PM 07 028, X, August, 2008.
22. Bredykhin, V., Shchur, T., et all. (2024). Determination of ways of improving the process of separation of seed materials on the working surface of the pneumatic sorting table. Agricultural Engineering. Vol. 28, №1. 51-71.
23. Konopka, S., Choszcz, D. J., & Markowski, P. (2017). Optimization of the Separation Parameters and Indicators of Separation Efficiency of Buckwheat Seeds. Sustainability, 9(11), 2134. <https://doi.org/10.3390/su9112134>.
24. Moroz S.M., Vasylovskyi O.M., Anisimov O.V., (2014). Technical means for simultaneous loading and separation of grain chaff according to the sizes. Collection of Scientific Works of Kirovohrad National Technical University. Machines in agricultural production, branch engineering and automation. No. 27. pp. 181-186. Kirovograd/Ukraine.

25. Moroz S.M., Vasylykovskiy O.M., Goncharov V.V., (2011). Analysis of multi-layer grain motion on the fixed inclined working surface. Design, production and operation of agricultural machines. A national interdepartmental scientific and technical collection of works, Vol.41, Part.1, pp. 203–207, Kirovohrad/Ukraine.
26. Israelachvili J.N. Intermolecular and Surface Forces. 3rd ed. Academic Press, 2011. 710 p. ISBN 978-0-12-391927-4.
27. Panasiewicz, M., Zawislak, K., Kusinska, E., Sobczak, P. (2008). Purification and separation of loose material in pneumatic system with vertical air stream. TEKA Komisji Motoryzacji Energetyzacji Rolnictwa, 8, 171-176.
28. 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. Режим доступу: <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/10486>.
29. Сільськогосподарські машини / В.Ю. Комаристов, М.М. Петренко, М.М. Косінов. – К.: Урожай, 1996. – 240 с.
30. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку: Підручник / Д.Г. Войтюк, В.М. Барановський, В.М. Булгаков та ін.; за ред. Д.Г. Войтюка. – К.: Вища освіта, 2005. – 464 с.
31. Механіко-технологічні властивості сільськогосподарських матеріалів: підручник / [Войтюк Д. Г. та ін.]; за ред. С. С. Яцуна. – [2-ге вид., перероб. і допов.]. – Суми: Сумський нац. аграр. ун-т, 2011. – 444 с.
32. Рудь Ю.С. Основи конструювання машин: Підручник для студентів інженерно-технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. 2-е вид., переробл. – Кривий Ріг: Видавець ФОП Чернявський Д.О., 2015. – 492 с.
33. Гандзюк М.П., Желібо Є.П., Халімовський М.О. Основи охорони праці: Підручник для студентів вищих навчальних закладів. За редакцією М.П. Гандзюка. – К.: Каравела, 2003. – 408 с.
34. Цілинский В.П. Охрана праці в рослинництві / В.П. Цілинский. – К.: "Урожай", 1991. – 136 с.

ДОДАТКИ