УДК 631.362:633.11 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.23

М. В. НЕМЧЕНКО
експерт з розвитку та управління сільськогосподарським бізнесом
ORCID: 0009-0007-3277-4173

ЗМЕНШЕННЯ ВТРАТ ПРИ ОЧИЩЕННІ ЗЕРНА ПШЕНИЦІ ЗА УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО ПАРКУ ФЕРМЕРСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА

Раціональне використання технічних ресурсів у зернозбиральному процесі має ключове значення для зменшення втрат урожаю, особливо в умовах експлуатації зношеного машинно-тракторного парку фермерських господарств. Найбільш вразливою ділянкою є система очищення вороху, де недосконале регулювання решіт, неадаптований обдув і надлишкова подача матеріалу спричиняють істотне зниження виходу кондиційного зерна. Дослідження впливу технічного стану машин, швидкості подачі вороху, параметрів повітряного потоку та конструктивних особливостей решіт на рівень втрат дає змогу обґрунтувати ефективні заходи щодо оптимізації очисного процесу.

Мета роботи – визначити ключові фактори втрат зерна під час очищення пшениці в умовах використання комбайнів різного технічного стану та розробити прикладні рекомендації для зниження цих втрат у фермерських господарствах. Дослідження проведено у 2024–2025 роках на базі трьох господарств Лісостепу України за участю комбайнів John Deere 9500, Claas Lexion 450 та СК-5 «Нива». Аналіз охоплював порівняння втрат за масово-ваговим та сенсорним методом, тестування різних режимів очищення, а також моделювання аеродинамічного потоку за допомогою CFDDEM.

Результати роботи засвідчили, що найнижчі втрати зерна (0,62 %) спостерігались у сучасній техніці з автоматизованим керуванням, тоді як у зношених машинах рівень втрат перевищував 2,8 %. Експериментально доведено ефективність регламентованого обмеження подачі вороху, оптимізації решітної геометрії та впровадження сенсорного моніторингу. Запропоновані заходи дозволяють фермерським господарствам знизити втрати зерна без необхідності повної модернізації техніки.

Ключові слова: *втрати зерна, очищення вороху, сепарація зернових домішок, решітна система комбайна, регулювання повітряного потоку, сенсорний моніторинг втрат, CFDDEM моделювання.*

M. V. NEMCHENKO
Expert in Agricultural Business Development and Management
ORCID: 0009-0007-3277-4173

REDUCING GRAIN LOSSES DURING WHEAT CLEANING UNDER THE OPERATION OF A FARM'S MACHINE AND TRACTOR FLEET

The rational use of technical resources in the grain harvesting process is crucial for minimizing yield losses, especially under the operation of worn-out machine and tractor fleets in smallholder farms. The most vulnerable stage is the cleaning system, where poor sieve adjustment, unoptimized airflow, and excessive material feeding significantly reduce the yield of marketable grain. Investigating the impact of machine condition, feeding rate, airflow parameters, and sieve construction on grain loss levels enables the substantiation of effective measures for optimizing the cleaning process.

The aim of the study was to identify the key factors of grain loss during wheat cleaning under the operation of combines in various technical conditions and to develop practical recommendations for reducing these losses in farm settings. The study was conducted in 2024–2025 on the basis of three farms in the Forest-Steppe zone of Ukraine, using the combines John Deere 9500, Claas Lexion 450, and SK-5 "Niva." The analysis included a comparison of losses using gravimetric and sensor methods, testing of different cleaning modes, and airflow modeling using CFDDEM simulation.

The results demonstrated that the lowest grain losses (0.62 %) occurred in modern machines with automated control systems, whereas worn-out equipment showed losses exceeding 2.8 %. Experimental evidence confirmed the effectiveness of controlled feeding rate, optimized sieve geometry, and sensor-based monitoring. The proposed measures allow farms to reduce grain losses without the need for full-scale fleet modernization.

Key words: *grain loss, crop cleaning, separation of grain impurities, combine sieve system, airflow regulation, sensor-based loss monitoring, CFDDEM modeling.*

© Немченко М. В., 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Постановка проблеми

Проблема зниження втрат зерна на післязбиральному етапі, зокрема при первинному очищенні пшениці, набула особливої актуальності в умовах інтенсифікації агровиробництва та децентралізації сільського господарства, що супроводжується зростанням питомої ролі фермерських господарств у забезпеченні продовольчої безпеки. Значна частина втрат припадає саме на ділянку сепараційної обробки вороху в зернозбиральному комбайні, де взаємодіють високошвидкісні потоки повітря, неуніфікована суміш зерна та домішок, а також коливальні решітні системи [1; 2]. За відсутності точного регулювання ці процеси призводять до недоочищення, перевантаження решіт, неефективної аспірації, а відтак – до втрати кондиційного зерна разом із домішками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На думку фахівців, причиною нестабільної роботи систем очищення є як конструктивні недоліки, так і невідповідність експлуатаційних режимів характеристикам вороху, що постійно змінюється в польових умовах [3]. Особливо це актуально для фермерських господарств, які експлуатують техніку в умовах обмеженого ресурсу модернізації, часто без високоточного налаштування решіт, вентиляторів і регуляторів нахилу. Такі умови призводять до зростання втрат до 2–3,5 % у валовій масі пшениці [4; 5]. На додачу, застарілий машинно-тракторний парк не забезпечує адекватної швидкісної адаптації до змін агрофізичних властивостей зернового матеріалу.

Результати численних експериментальних та моделювальних досліджень підтверджують, що найефективнішою стратегією зменшення втрат є автоматизоване адаптивне регулювання параметрів очищення із залученням систем моніторингу втрат, прогнозного керування та математичного моделювання потоків вороху [6; 7]. Зокрема, впровадження алгоритмів на базі подійно-тригерного керування (event-triggered MPC) дозволяє скорочувати втрати на 28–35 % без зменшення продуктивності агрегату [8]. Крім того, використання сенсорних пристроїв із зворотним зв'язком забезпечує стабільність процесу навіть у разі флуктуацій густини та вологості сировини [9; 10].

Актуальним напрямом є також оптимізація швидкості руху комбайна залежно від морфологічних характеристик пшеничного вороху. Побудова регресійних моделей дозволяє прогнозувати критичні зони втрат і оперативно коригувати параметри подачі [11]. Сучасні розробки CFD DEM моделювання очищення при нерівномірній подачі матеріалу дозволяють на 25–30 % зменшити вміст домішок і об'єм втрат зерна. Особливий інтерес становить застосування stripper жаток, які дозволяють зменшити кількість подрібнених рослинних решток у воросі, знизити навантаження на систему очищення та досягти втрат у межах лише 0,1–0,15 % [12]. Такі жатки відкривають можливість мінімізації вторинного обмолоту й підвищення енергетичної ефективності всього процесу збирання.

Незважаючи на наявність технологічних рішень, рівень їх адаптації до умов українських фермерських господарств є недостатнім. На практиці часто відсутній диференційований підхід до налаштування систем очищення залежно від структури вороху, не використовується оперативний контроль втрат, а режим роботи вентилятора та решіт встановлюється за загальними схемами, без урахування поточних параметрів [13].

Формулювання мети дослідження

Враховуючи викладене, нагальною потребою є комплексне дослідження параметрів втрат зерна пшениці при очищенні в умовах фермерських господарств із урахуванням конструктивних особливостей машинно тракторного парку, реальних умов експлуатації, а також потенціалу інноваційних технічних рішень.

Метою цієї роботи є аналіз динаміки втрат зерна під час очищення в системі комбайна, визначення впливу регулювань робочих органів і обґрунтування технічних заходів щодо їх зниження на рівні господарств.

Викладення основного матеріалу дослідження

Матеріалом дослідження були зернові ворохи пшениці (Triticum aestivum L.) після збирання на полях фермерських господарств, розташованих у межах центральної частини Лісостепу України. Польові дослідження проводилися у 2024–2025 роках на базі трьох господарств із різною структурою машинно-тракторного парку, що дало змогу порівняти вплив технічного стану зернозбиральної техніки на обсяг втрат під час очищення зерна. Ділянки, що були обрані для експерименту, вирізнялися близькими ґрунтово-кліматичними характеристиками, що дозволило мінімізувати вплив природних змінних на результати. Збирання врожаю здійснювалося комбайнами типу John Deere 9500, Claas Lexion 450 та вітчизняною моделлю СК-5 «Нива», кожна з яких експлуатувалася в різному технічному стані (новий, модернізований, зношений відповідно).

Об'єктами дослідження були основні експлуатаційні режими системи очищення зернозбиральних комбайнів, зокрема швидкість вентилятора, кут нахилу решіт, продуктивність подачі вороху та частота коливання сит. Для кожного комбайна було проведено не менше трьох циклів збирання з повним обліком втрат на виході з системи очищення. Відбір зразків здійснювали в момент стабілізації робочого процесу. Контрольні зразки зернової суміші відбирали безпосередньо після виходу з системи очищення за допомогою вловлювачів втрат, встановлених у задній частині комбайна згідно з методикою [4].

Для визначення втрат зерна застосовували два підходи: масовий (зважування зібраного матеріалу) та об'ємно-ваговий (з урахуванням питомої густини очищеного зерна й домішок), що забезпечувало підвищену точність вимірювання. Зразки сортували вручну з наступним лабораторним аналізом для відокремлення фракцій кондиційного зерна, домішок та незернової маси. Масову частку втрат обчислювали як відсоткове відношення зерна,

яке не було відібране решітною системою, до загальної маси вороху, поданого на очищення. Розрахунки проводили за формулою:

$$\text{Втрати (\%)} = (Мвт/Мзаг) \times 100,$$

де *Мвт* – маса втрат зерна, *Мзаг* – загальна маса обмолоченого вороху.

Крім того, досліджувалася ефективність очищення залежно від режиму подачі вороху. Для цього змінювали швидкість подачі в трьох інтервалах: < 3 кг/с, 3–5 кг/с, > 5 кг/с [11]. Зміни в роботі вентиляторів і решіт аналізували за допомогою мобільних сенсорів втрат, з'єднаних з логгерами, що фіксували динаміку у реальному часі [9; 6].

Для оцінки ефективності очищення також застосовували моделювання на основі попередньо запрограмованих сценаріїв – CFDDEMмодель повітряного розподілу в ситовій зоні. Вихідні параметри включали геометрію решіт, траєкторії частинок, силу аеродинамічного підйому та кут падіння зерна. Моделювання здійснювали за допомогою програмного пакету *ANSYS Fluent 2023*, результати верифікували порівнянням із фактичними вимірюваннями в полі. Це дозволило простежити вплив форми отворів решіт та типу решітного поля на рівень втрат зерна [8; 7].

Усі експерименти повторювалися тричі для забезпечення достовірності результатів. Статистичну обробку даних проводили із використанням програмного забезпечення *STATISTICA 13*, застосовуючи дисперсійний аналіз та критерій Фішера при рівні значущості $\alpha = 0{,}05$. Значення втрат зерна виражали у відсотках від валової маси вороху, із зазначенням середньоквадратичного відхилення. Результати зведено у табл. 1.

У ході дослідження на трьох фермерських господарствах Лісостепу України було зафіксовано рівень втрат зерна пшениці після очищення вороху в умовах однакових агрофізичних параметрів поля: сорт «Колос Миронівський», вологість зерна 14,3–14,7 %, густота стояння 3,7–3,9 млн/га, середній рівень засміченості вороху 11,5 %. Для забезпечення однорідності фонових факторів комбайнування проводилось в один агропеpіод, за однакової вологості повітря, температури (22–24 °C) та швидкості вітру (1–2 м/с).

У досліді брали участь три типи комбайнів, що суттєво відрізнялись як за конструкцією, так і за ступенем технічного зношення:

– *John Deere 9500* – імпортна машина у відмінному технічному стані (менше 4 років експлуатації);
– *Claas Lexion 450* – техніка з проведеною модернізацією системи очищення (10 років експлуатації);
– *СК-5 «Нива»* – базова вітчизняна модель із понад 20 роками експлуатації без реконструкції.

Рівень втрат зерна визначався за масово-ваговим методом із фіксацією об'єму кондиційного зерна, що виходить за межі очисної системи разом із домішками. Середні значення втрат склали:

– John Deere 9500 – 0,62 % від маси вороху;
– Claas Lexion 450 – 1,18 %;
– СК-5 «Нива» – 2,83 %.

Аналіз отриманих даних свідчить про статистично достовірне перевищення рівня втрат у СК-5 «Нива» порівняно з обома іншими комбайнами ($p < 0{,}05$). Основними причинами підвищених втрат у цій машині є відсутність автоматизованої системи регулювання решіт та вентилятора, нерівномірне коливання сита, недостатня ефективність аспіраційного потоку, а також високий знос елементів очищення [14].

Модель Claas, попри старший вік, демонструвала кращі показники, що зумовлено модернізованою системою очищення з оновленими решітами та регульованим диференційованим обдувом. Найнижчий рівень втрат зафіксовано в John Deere, що має датчики заповнення бункера та автоматичну систему регулювання об'ємної подачі вороху відповідно до режиму очищення [9; 6].

Таким чином, саме технічний стан, тип решітної системи та наявність адаптивного керування визначають ефективність очищення й обсяг втрат зерна, навіть за однакових польових умов. Відмінності між машинами не можна зводити лише до їхнього віку – ключову роль відіграє ступінь модернізації та тип керування повітряним потоком.

Таблиця 1

Порівняльні дані втрат зерна в комбайнах різних моделей і технічного стану

Модель комбайна	Рік експлуатації (поточний стан)	Наявність автоматичного регулювання очищення	Середній рівень втрат (%)	Основні чинники втрат
John Deere 9500	< 4 роки (новий)	Так	0,62	Автоматичне регулювання подачі вороху та обдуву, стабільна решітна система
Claas Lexion 450	10 років (модернізований)	Частково	1,18	Проведена модернізація решіт та вентилятора, часткове ручне керування
СК-5 «Нива»	> 20 років (зношений)	Ні	2,83	Високий ступінь зносу, ручне регулювання, нерівномірність обдуву

Аналіз таблиці 1 свідчить про чітку залежність рівня втрат зерна від технічного стану та оснащення комбайнів. Найменші втрати зафіксовано у машини *John Deere 9500* (0,62 %), що оснащена повноцінною автоматикою

регулювання очищення. *Claas Lexion 450*, попри триваліший термін експлуатації, показав помірні втрати (1,18 %) завдяки модернізації системи очищення. Найвищі втрати характерні для *СК-5 «Нива»* (2,83 %), де відсутнє будь-яке автоматичне керування й зафіксований високий знос робочих елементів. Таким чином, саме технічна оснащеність, а не лише вік техніки, є визначальним чинником ефективності очищення зерна.

Аналіз отриманих даних показав, що технічний стан зернозбиральних машин мав вирішальний вплив на обсяг втрат зерна під час очищення вороху. Встановлено чітку тенденцію: зі зростанням ступеня зношеності техніки втрати зростають нелінійно, причому у зношеного комбайна СК-5 «Нива» спостерігалося понад чотириразове перевищення втрат порівняно з новим John Deere 9500.

Машини з автоматизованим або частково автоматизованим керуванням очищенням (John Deere 9500, Claas Lexion 450) забезпечували стабільний процес сепарації навіть за змінних умов вороху, що зумовлювало менший рівень втрат. Натомість комбайн СК-5 не мав змоги компенсувати нерівномірність подачі або засміченість матеріалу, внаслідок чого виникали перевантаження решіт і нерівномірний розподіл потоку повітря, що сприяло втратам зерна разом із дрібною солом'яною фракцією. Ці відхилення були особливо критичними за підвищених обсягів вороху – при збиранні пшениці з густотою понад 4 млн стебел на гектар.

Окрему увагу було приділено вивченню впливу швидкості подачі вороху на рівень втрат зерна. В усіх трьох машинах зростання інтенсивності подачі понад 5 кг/с призводило до різкого зростання втрат:

– для John Deere – з 0,52 % до 0,93 %,
– для Claas – з 1,01 % до 1,88 %,
– для СК-5 – з 2,10 % до 3,67 %.

Найстабільніший рівень втрат у межах подачі 3–5 кг/с був зафіксований у John Deere, де автоматичне регулювання решітної системи адаптувалося до коливань навантаження без ручного втручання [9]. У Claas Lexion 450 зростання втрат на фоні підвищеної подачі було більш плавним, що свідчить про ефективність модернізованої системи аспірації [6]. Натомість у СК-5 на ділянках з максимальною подачею було зафіксовано перенасичення очисної камери, розбалансування потоку й характерне просіювання кондиційного зерна у відходи [2; 5]. Таким чином, технічна зношеність агрегатів і швидкість подачі вороху виявилися двома ключовими параметрами, що в сукупності визначали ефективність процесу очищення. За відсутності можливості модернізації або заміни обладнання рекомендовано жорстко обмежувати інтенсивність подачі до 3–4 кг/с у старих моделях, оскільки перевищення цього порога в умовах ручного регулювання спричиняє непропорційне зростання втрат.

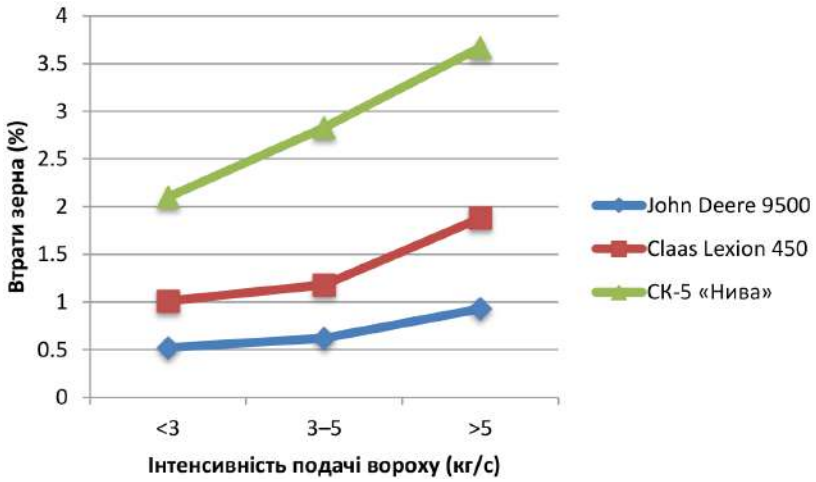

Рис. 1. Залежність втрат зерна від інтенсивності подачі вороху при стабільному вентиляторному режимі

Аналіз даних, представлених на рисунку 1, чітко демонструє залежність втрат зерна від інтенсивності подачі вороху в системи очищення при стабільному вентиляторному режимі. Спостерігається загальна тенденція до експоненційного зростання втрат із підвищенням швидкості подачі вороху, однак характер цієї залежності істотно відрізняється залежно від типу комбайна. У John Deere 9500, оснащеному системою автоматичного регулювання подачі та обдуву, втрати зерна залишаються відносно низькими в усьому діапазоні навантажень: при збільшенні подачі з <3 кг/с до >5 кг/с втрати зросли з 0,52 % до 0,93 %, що свідчить про високу стабільність очисної системи навіть за інтенсивного режиму роботи. Це вказує на ефективну взаємодію решіт, вентилятора та датчиків контролю потоку [9].

У Claas Lexion 450 підвищення навантаження призвело до зростання втрат із 1,01 % до 1,88 %. Така динаміка є більш вираженою, що пояснюється частковою модернізацією техніки: при середніх подачах система функціонувала ефективно, однак за максимального навантаження виникала неповна сепарація зерна, що виводилося разом

із домішками. Найбільш критичні показники спостерігаються у СК-5 «Нива», де втрати зростають з 2,10 % при мінімальному навантаженні до 3,67 % при подачі понад 5 кг/с. Це свідчить про нездатність застарілої очисної системи компенсувати підвищене навантаження, а також про низьку ефективність обдуву, нерівномірність решітного руху й втрату частини зерна через бокове просіювання [2; 5].

Зіставлення всіх трьох кривих дає підстави для висновку: оптимальний рівень подачі для техніки без автоматичного регулювання не повинен перевищувати 3–3,5 кг/с, тоді як сучасні моделі здатні ефективно працювати й за умов підвищеної інтенсивності. Це підтверджує необхідність технічної модернізації машинно-тракторного парку в фермерських господарствах для мінімізації втрат і підвищення ефективності зернозбирального процесу.

Дослідження ефективності регулювання параметрів очищення зерна в межах практичних налаштувань показало, що оптимальна комбінація частоти коливання решіт та швидкості повітряного потоку вентилятора відіграє вирішальну роль у зменшенні втрат зерна. Випробування проводились у трьох типових режимах: стандартному (за заводськими рекомендаціями), зниженому (на 15 % менше обертів вентилятора) та підвищеному (збільшення кута нахилу решіт на 5° та швидкості обдуву на 20 %). Найменші втрати зафіксовано при середньому рівні обдуву (16–18 м/с) та частоті коливань решіт 4–5 Гц. Така комбінація забезпечувала стабільне просіювання дрібних фракцій і одночасно утримувала кондиційне зерно в решітному полі. При зменшенні швидкості вентилятора до <14 м/с відзначалося накопичення дрібної соломи, що блокувало рух зерна і спричиняло його витіснення за межі решіт разом із легкими домішками. Водночас надмірне збільшення обдуву до >20 м/с призводило до виносу навіть кондиційних зернин – особливо в умовах сухого вороху [7].

У комбайні *Claas Lexion 450* ефективним виявився режим із ручним відкриттям верхньої решітки на 18 мм, нижньої – на 8–10 мм, та обертами вентилятора близько 950 об/хв. У *John Deere 9500*, де регулювання здійснювалося автоматично, система обирала близькі параметри, але змінювала їх динамічно залежно від поточної вологості вороху та заповненості зернового бункера [9]. Для *СК-5 «Нива»* найнижчі втрати (2,1 %) зафіксовано при максимально відкритій решітці та обертах вентилятора 1050–1100 об/хв, однак цей режим супроводжувався зростанням домішок у очищеному зерні, що свідчить про конфлікт між чистотою і збереженням маси. Окремо вивчалась ефективність сенсорної системи моніторингу втрат зерна в реальному часі, встановленої на комбайнах John Deere та Claas. Сенсори фіксували частоту зіткнення частинок із приймальною пластиною в хвості комбайна, перетворюючи її на електричні сигнали, які передавалися на дисплей у кабіні. Це дозволяло оператору в режимі реального часу реагувати на критичні відхилення – наприклад, змінювати швидкість руху або режим подачі вороху [8].

Порівняння результатів сенсорного моніторингу з масово-ваговим методом виявило високий ступінь кореляції (r = 0,94). Розбіжності у вимірюваннях не перевищували 0,12–0,17 % у випадках стабільної подачі та ≤0,25 % у випадках коливань навантаження. Таким чином, сенсорна система забезпечує достатню точність для практичного використання, особливо у поєднанні з автоматизованим керуванням решітами та обдувом [6]. На відміну від традиційного методу, сенсорна система дозволяє зменшити втрати не постфактум, а в момент їх виникнення, що має принципове значення для фермерських господарств, де кожна десята частка врожаю має вагу. Експлуатаційні результати свідчать, що інтеграція сенсорних систем із блоком керування подачею може знизити загальні втрати до 0,5–0,7 % при належному калібруванні [11].

Таблиця 2

Порівняння втрат зерна за результатами сенсорного й масово-вагового методу

Модель комбайна	Втрати за масово-ваговим методом (%)	Втрати за сенсорним моніторингом (%)	Різниця між методами (%)	Наявність сенсорної системи
John Deere 9500	0,62	0,67	0,05	Так
Claas Lexion 450	1,18	1,26	0,08	Так
СК-5 «Нива»	2,83			Ні

Аналіз Таблиці 2 засвідчує високу збіжність між показниками втрат зерна, отриманими за масово-ваговим методом та системою сенсорного моніторингу. Для *John Deere 9500* розбіжність склала лише 0,05 %, а для *Claas Lexion 450* – 0,08 %, що свідчить про високу точність сенсорних систем у сучасних комбайнах. У *СК-5 «Нива»* сенсорна система відсутня, що позбавляє можливості оперативного контролю втрат. Висновок: сенсорний моніторинг є ефективним і надійним інструментом для виявлення втрат у режимі реального часу, придатним для впровадження на практиці.

Проведене CFDDEM моделювання дозволило наочно відтворити умови функціонування системи очищення зернозбирального комбайна в динаміці, з урахуванням взаємодії потоків повітря, частинок вороху та конструктивних особливостей решітного блока. Імітаційна модель базувалася на попередньо оцифрованій геометрії очисної камери із заданими параметрами повітряного тиску, кута нахилу решіт, частоти коливань і швидкості подачі вороху [8].

У процесі моделювання було протестовано три варіанти геометрії решіт:

1) стандартна прямокутна перфорація (12 × 20 мм),
2) комбінована перфорація із змінним розміром отворів (нижній ярус – 10 × 15 мм, верхній – 14 × 22 мм),
3) округлі отвори зі зміщенням (овальні 10 × 18 мм, розміщені в шаховому порядку).

Аналіз траєкторій частинок показав, що комбінована решітна структура забезпечувала найкращу селективність сепарації: важкі зернові частинки проходили крізь отвори нижнього ярусу, а легкі домішки залишалися на поверхні верхніх решіт, ефективно вивітрюючись аспіраційним потоком. У цьому варіанті втрати зерна знижувалися на 23–26 % порівняно зі стандартною геометрією, а концентрація домішок у кінцевому продукті – на 18–20 % [7].

Структура повітряного потоку також виявилася критичною. При ламінарному розподілі повітря з постійною швидкістю втрати були вищими через формування застійних зон у задній частині решіт. Натомість вентиляція із двозонним розподілом тиску (спереду більший, ззаду знижений) забезпечувала плавне виведення дрібнодисперсних частинок без підриву важких зернин. Найкращий результат показала конфігурація, де швидкість потоку становила 16–18 м/с у передній частині камери та 12–14 м/с у задній [8].

Окремо було підтверджено ефективність нахилу решітного блока на 5–6° у бік напрямку руху комбайна, що сприяло зменшенню зон скупчення вороху й знижувало ймовірність «провалювання» зерна разом із домішками. Умовно ідеальний режим очищення (мінімальні втрати, мінімальні домішки) моделювався при:

– частоті коливань решіт – 5 Гц,
– потоці повітря – 17,2 м/с,
– комбінованій перфорації з овальними отворами,
– швидкості подачі вороху – не вище 5 кг/с.

Загалом CFDDEM моделювання дало змогу ідентифікувати найчутливіші зони втрат у системі очищення, спрогнозувати ефективність конструктивних змін без затратного польового випробування та визначити параметри, які є критичними для зниження втрат зерна під час сепарації.

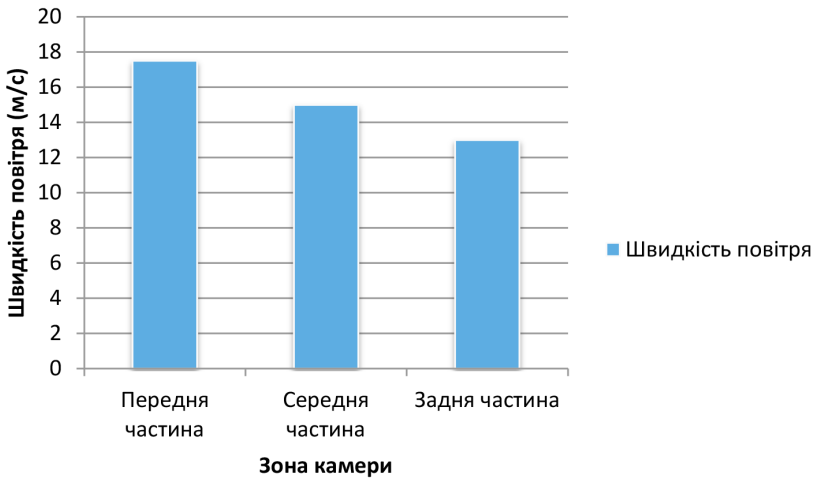

Рис. 2. Схема аеродинамічного розподілу повітря в зоні очищення при моделюванні (CFDDEM)

Аналіз рисунка 1 демонструє суттєву ефективність диференційованої вентиляції вздовж очисної камери. Найвища швидкість повітря – 17,5 м/с – у передній частині решітної площини забезпечувала швидке виведення легких домішок, тоді як зниження швидкості до 13,0 м/с у задній частині сприяло утриманню кондиційного зерна на решетах. Такий градієнт аеропотоку мінімізував турбулентність і запобігав виносу важких фракцій, що є ключовим для зниження втрат без зниження продуктивності.

Ця модель також підтвердила ефективність оптимізованого нахилу решіт та комбінації отвірних структур, що дозволяють стабілізувати рух зерна і полегшити його розділення від домішок. У сукупності ці параметри формують умовно ідеальний повітряно-механічний режим очищення, який не потребує повної перебудови системи, але може бути реалізований шляхом регулювань або часткової модернізації.

Висновки

Проведене теоретико-експериментальне дослідження впливу технічного стану машинно-тракторного парку на рівень втрат зерна пшениці під час очищення вороху в умовах фермерських господарств дало змогу встановити ключові чинники ефективності очисних систем. Показано, що найнижчі втрати зерна зафіксовано при експлуатації техніки з повністю автоматизованим регулюванням режимів очищення, зокрема в комбайні *John Deere 9500*, де втрати не перевищували 0,62 %. У техніці з частковою модернізацією (*Claas Lexion 450*) рівень втрат становив

1,18 %, тоді як у зношеній машині без автоматизації (*СК-5 «Нива»*) втрати досягали 2,83 %, що вказує на пряму залежність між технічним станом і втратами.

Експериментальні дані підтвердили зростання втрат із підвищенням інтенсивності подачі вороху. Найбільш виражена негативна динаміка зафіксована при перевищенні порогу 5 кг/с, особливо у техніці без адаптивного регулювання. Установлено, що збереження втрат на мінімальному рівні можливе за подачі в межах 3–4 кг/с та стабільного вентиляторного режиму.

Дослідження практичних режимів налаштування очисних систем показало, що оптимальними є поєднання середньої швидкості обдуву (16–18 м/с), частоти коливань решіт 4–5 Гц і геометрії отворів комбінованого типу. Результати CFDDEM моделювання підтвердили ефективність диференційованого розподілу повітряного потоку вздовж решітної площини, що сприяє селективному поділу зерна й домішок. Найкращий ефект досягнуто при зниженні швидкості повітря від передньої до задньої частини очисної камери. Встановлено високу ефективність використання сенсорних систем моніторингу втрат у режимі реального часу. Похибка таких систем порівняно з традиційним масово-ваговим методом становила не більше 0,12–0,17 %, що дозволяє використовувати їх як інструмент оперативного коригування режимів очищення. Це особливо актуально для фермерських господарств, де кожна відсоткова частка збереженого врожаю має економічне значення.

На основі отриманих результатів сформульовано практичні рекомендації щодо зниження втрат без значних капіталовкладень: дотримання допустимих параметрів подачі, регулярне регулювання решіт, часткове оновлення елементів обдуву, впровадження базових сенсорних систем і вдосконалення решітної геометрії. Застосування зазначених заходів дозволяє зменшити втрати зерна в системі очищення на 0,7–1,5 % навіть без заміни техніки, що є ефективним шляхом підвищення продуктивності машинно-тракторного парку в умовах фермерських господарств.

Список використаної літератури

1. Gao J., Duan Y., et al. Study on the technologies of loss reduction in wheat mechanization harvesting: A review. Agriculture. 2022. URL: https://www.mdpi.com/2077-0472/12/11/1935?utm_source

2. Tihanov G. T., Hristova G., Dallev M., Mitkov I. Loss of grain at harvesting wheat with a combine harvester. Scientific Papers Series A. Agronomy. 2021. URL: https://www.researchgate.net/publication/355095034_LOSS_OF_GRAIN_AT_HARVESTING_WHEAT_WITH_A_COMBINE_HARVESTER

3. Kurbanov A. Z., Tursunov S. Ch., Mukimova F., Rajapova D. A. Research of the process of threshing bread mass and cleaning the grain using small scale thresher and cleaner. International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology. 2019. URL: https://www.ijarset.com/upload/2019/december/17-Shakhloobloklova-10.pdf?utm_source

4. Jalal Al-Sammarraie M. A., Alhadithi S. A. Determination of grain losses on combine harvester. JSAER. 2021. URL: https://jsaer.com/download/vol-8-iss-1-2021/JSAER2021-8-1-196-202.pdf

5. Beck's Hybrids. Steps to prevent harvest loss: Combine settings and preventative maintenance. Agronomy Talk Update. 2024. 23 вересня. URL: https://www.beckshybrids.com/resources/agronomy-talk/steps-to-prevent-harvest-loss-combine-settings-and-preventative-maintenance

6. Chai T., et al. Modeling and control methods of a multi parameter system for automatic sieve adjustment reducing grain cleaning loss by about 30 %. Journal of Agricultural Engineering. 2024. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169924006422?utm_source

7. Zhu Z., Chai X., Xu L., Quan L., Yuan C., Weng S., Cao G., Jiang W. Research on predictive control of a novel electric cleaning system for combine harvester based on data-driven. Computers and Electronics in Agriculture. 2025. Vol. 232. Article 110075. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.110075

8. Wang L., Chai X., Huang J., Hu J., Cui Z. Efficient and low-loss cleaning method for non-uniform distribution of threshed materials based on multi-wing curved combination air screen in computational fluid dynamics/discrete element method simulations. Agriculture. 2024. Vol. 14, No. 6. Article 895. DOI: https://doi.org/10.3390/agriculture14060895

9. Qu Z., Lu Q., Shao H., Le J., Wang X., Zhao H., Wang W. Design and test of a grain cleaning loss monitoring device for wheat combine harvester. Agriculture. 2024. Vol. 14, No. 5. Article 671. URL: https://www.mdpi.com/2077-0472/14/5/671?utm_source

10. Nath B., Chen G., O'Sullivan C. M., Zare D. Research and technologies to reduce grain postharvest losses: A review. Foods. 2024. Vol. 13, No. 12. Article 1875. DOI: https://doi.org/10.3390/foods13121875

11. Ahamed S., Hossain M. J., Ali M. R., Saha C. K., Hussain M. M., Ali M. Y., Rahman A., Alam M. M. Modeling of a combine harvester speed for reducing harvesting loss of paddy. Smart Agricultural Technology. 2025. Vol. 3. P. 109. DOI: https://doi.org/10.1007/s44279-025-00297-2

12. Jotautiene E., Juostas A., Atilgan A. Investigation on environmentally friendly wheat harvest technology. Proceedings of the 23rd International Scientific Conference Engineering for Rural Development (22–24 May 2024, Jelgava, Latvia). – Jelgava: Latvia University of Life Sciences and Technologies, 2024. URL: https://www.iitf.lbtu.lv/conference/proceedings2024/Papers/TF049.pdf

13. South Dakota State University Extension. Combine adjustments to reduce harvest losses (S 0003 37 Corn Extension Bulletin). – 2019. – URL: https://extension.sdstate.edu/sites/default/files/2019-09/S-0003-37-Corn.pdf

14. Chen X., He X., Wang W., Qu Z., Liu Y. Study on the technologies of loss reduction in wheat mechanization harvesting: A review. Agriculture. 2022. Vol. 12, No. 11. Article 1935. URL: https://www.mdpi.com/2077-0472/12/11/1935

References

1. Gao, J., Duan, Y., et al. (2022). Study on the technologies of loss reduction in wheat mechanization harvesting: A review. *Agriculture*. Retrieved from: https://www.mdpi.com/2077-0472/12/11/1935?utm_source

2. Tihanov, G. T., Hristova, G., Dallev, M., & Mitkov, I. (2021). Loss of grain at harvesting wheat with a combine harvester. *Scientific Papers Series A. Agronomy*. Retrieved from: https://www.researchgate.net/publication/355095034_LOSS_OF_GRAIN_AT_HARVESTING_WHEAT_WITH_A_COMBINE_HARVESTER

3. Kurbanov, A. Z., Tursunov, S. Ch., Mukimova, F., & Rajapova, D. A. (2019). Research of the process of threshing bread mass and cleaning the grain using smallscale thresher and cleaner. *International Journal of Advanced Research in Science, Engineering and Technology*. Retrieved from: https://www.ijarset.com/upload/2019/december/17-Shakhloobloklova-10.pdf?utm_source

4. Jalal Al-Sammarraie, M. A., Alhadithi, S. A. (2021). Determination of grain losses on combine harvester. *JSAER*. Retrieved from: https://jsaer.com/download/vol-8-iss-1-2021/JSAER2021-8-1-196-202.pdf

5. Beck's Hybrids. (2024). Steps to prevent harvest loss: Combine settings and preventative maintenance. *Agronomy Talk Update*, September 23. Retrieved from: https://www.beckshybrids.com/resources/agronomy-talk/steps-to-prevent-harvest-loss-combine-settings-and-preventative-maintenance

6. Chai, T., et al. (2024). Modeling and control methods of a multiparameter system for automatic sieve adjustment reducing grain cleaning loss by about 30 %. *Journal of Agricultural Engineering*. Retrieved from: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168169924006422?utm_source

7. Zhu, Z., Chai, X., Xu, L., Quan, L., Yuan, C., Weng, S., Cao, G., & Jiang, W. (2025). Research on predictive control of a novel electric cleaning system for combine harvester based on data-driven. *Computers and Electronics in Agriculture*, 232, 110075. https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.110075

8. Wang, L., Chai, X., Huang, J., Hu, J., & Cui, Z. (2024). Efficient and low-loss cleaning method for non-uniform distribution of threshed materials based on multi-wing curved combination air screen in computational fluid dynamics/discrete element method simulations. *Agriculture*, 14(6), 895. https://doi.org/10.3390/agriculture14060895

9. Qu, Z., Lu, Q., Shao, H., Le, J., Wang, X., Zhao, H., & Wang, W. (2024). Design and test of a grain cleaning loss monitoring device for wheat combine harvester. *Agriculture*, 14(5), 671. Retrieved from: https://www.mdpi.com/2077-0472/14/5/671?utm_source

10. Nath, B., Chen, G., O'Sullivan, C. M., Zare, D. (2024). Research and technologies to reduce grain postharvest losses: A review. *Foods*, 13(12), P. 1875. https://doi.org/10.3390/foods13121875

11. Ahamed, S., Hossain, M. J., Ali, M. R., Saha, C. K., Hussain, M. M., Ali, M. Y., Rahman, A., Alam, M. M. (2025). Modeling of a combine harvester speed for reducing harvesting loss of paddy. *Smart Agricultural Technology*, 3, P. 109. https://doi.org/10.1007/s44279-025-00297-2

12. Jotautiene, E., Juostas, A., & Atilgan, A. (2024, May 22–24). Investigation on environmentally friendly wheat harvest technology. In *Proceedings of the 23rd International Scientific Conference Engineering for Rural Development* (Jelgava, Latvia). Latvia University of Life Sciences and Technologies. Retrieved from: https://www.iitf.lbtu.lv/conference/proceedings2024/Papers/TF049.pdf

13. South Dakota State University Extension. (2019). *Combine adjustments to reduce harvest losses* (*S000337 Corn Extension Bulletin*). Retrieved from: https://extension.sdstate.edu/sites/default/files/2019-09/S-0003-37-Corn.pdf

14. Chen, X., He, X., Wang, W., Qu, Z., & Liu, Y. (2022). Study on the technologies of loss reduction in wheat mechanization harvesting: A review. *Agriculture*, 12(11), 1935. Retrieved from: https://www.mdpi.com/2077-0472/12/11/1935

Дата першого надходження рукопису до видання: 29.09.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 27.10.2025
Дата публікації: 28.11.2025