

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра механічної та електричної інженерії

ПОЯСНОВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
на здобуття ступеня вищої освіти магістр
бакалавр, магістр

на тему: «Удосконалення конструктивних параметрів системи аспірації
елеватора»

Виконав: здобувач вищої освіти за
освітньо-професійною програмою
Машини і засоби механізації
сільськогосподарського виробництва
назва ОПП

спеціальності 133 Галузеве
машинобудування

код та найменування спеціальності

ступеня вищої освіти магістр групи 1
Отченашенко Назар Сергійович

Прізвище та ініціали здобувача вищої освіти

Керівник: Канівець О. В.
Прізвище та ініціали керівника

Рецензент: Келемеш А. О.
Прізвище та ініціали рецензента

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра механічної та електричної інженерії

Освітньо-професійна програма «*Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва*»

Спеціальність 133 «*Галузеве машинобудування*»
Ступінь вищої освіти *магістр*

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри механічної та електричної інженерії,
канд. техн. наук, доцент,
_____ Станіслав ПОПОВ
09 грудня 2024 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

ОТЧЕНАШЕНКО Назар

1. Тема роботи: «*Удосконалення конструктивних параметрів системи аспірації елеватора*», керівник роботи *канд. техн. наук, доцент КАНІВЕЦЬ Олександр*, затверджено засіданням кафедри, протокол №5 від 09.12.2024 р.
2. Строк подання здобувачем вищої освіти роботи – 05 грудня 2025 р.
3. Вихідні дані до роботи: *аналіз літературних джерел Полтавської обласної універсальної наукової бібліотеки імені Івана Котляревського; аналіз літературних джерел Національної бібліотеки України імені Володимира Вернадського; сучасний досвід підприємств машинобудування та АПК за тематичним спрямуванням.*
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):
Розділ 1. Аналіз існуючих досліджень.
Розділ 2. Методика досліджень.
Розділ 3. Результати експериментів.
Розділ 4. Практична реалізація розробок.
5. Перелік ілюстраційного матеріалу: *титульний аркуш; назва теми, мета і задачі дослідження; огляд літературних джерел; методика досліджень (моделі, плани експериментів, перевірка адекватності математичних моделей); результати експериментальних досліджень; висновки.*

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Власне ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання отримав
Практична реалізація розробок	Надія ОПАРА, професорка кафедри механічної та електричної інженерії		
	Олександр КАЛІНІЧЕНКО, доцент кафедри економіки та публічного управління		
	Павло ПИСАРЕНКО, завідувач кафедри екології, збалансованого природокористування та захисту довкілля		

7. Дата видачі завдання 09 грудня 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з.п.	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вибір і затвердження теми роботи	До 09.12.24	
2	Складання і затвердження розгорнутого плану та завдання на кваліфікаційну роботу	09.12-15.12.24	
3	Оприцювання літературних джерел		
4	Збір, вивчення і обробка інформації, необхідної для виконання роботи	16.12-22.12.24	
5	Виконання розділів роботи		
6	Оформлення тексту роботи	23.06-06.07.25	
7	Попередній захист роботи на кафедрі		
8	Доопрацювання роботи з урахуванням зауважень і пропозицій	01.12-05.12.25	
9	Нормалізаційний контроль		
10	Захист кваліфікаційної роботи	15.12-19.12.25	

Здобувач вищої освіти _____ Назар ОТЧЕНАШЕНКО
(підпис)

Керівник роботи _____ Олександр КАНІВЕЦЬ
(підпис)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 4 розділи, 19 рисунків, 6 таблиць, 30 використаних джерел, 92 сторінки.

Мета роботи – підвищення ефективності післязбиральної обробки зерна шляхом удосконалення комбінованої системи очищення, аспірації та сушіння зерна на елеваторі.

Об'єкт дослідження – технологічні процеси очищення, аспірації та сушіння зерна в умовах елеваторного виробництва.

Предмет дослідження – конструктивні та технологічні параметри комбінованої системи очищення, аспірації та сушіння зерна, а також їх вплив на продуктивність, енерговитрати та якість обробки зернового матеріалу.

Практична значущість роботи полягає в обґрунтуванні та розробленні удосконаленої комбінованої системи післязбиральної обробки зерна, що забезпечує зменшення втрат тиску в аспіраційній мережі, стабілізацію повітряних потоків у сушильній зоні, підвищення ефективності пиловловлювання та зниження експлуатаційних витрат. Отримані результати можуть бути використані при модернізації елеваторів середньої продуктивності.

У **першому розділі** виконано аналіз сучасного стану післязбиральної обробки зерна на елеваторах. Розглянуто існуючі технологічні схеми очищення, аспірації та сушіння зерна, їх переваги й недоліки. Встановлено, що значна частина обладнання є морально та фізично застарілою, характеризується підвищеними енерговитратами, нерівномірністю режимів обробки та високим рівнем пилових викидів, що зумовлює необхідність удосконалення комбінованих систем.

У **другому розділі** наведено методичку експериментальних досліджень процесів очищення та сушіння зерна. Описано лабораторну установку, вимірювальні прилади та методи визначення параметрів повітряного потоку, вологості, температури та енергетичних показників. Обґрунтовано вибір режимів експериментів і методи статистичної обробки результатів.

У **третьому розділі** представлено результати експериментальних досліджень та аналіз впливу конструктивних і технологічних параметрів на ефективність роботи аспіраційно-сушильної системи. Встановлено закономірності зміни швидкості повітря, втрат тиску та ефективності видалення пилу залежно від конфігурації повітроводів і режимів роботи сушарки. Запропоновано удосконалену конструкцію комбінованої системи «очищення – аспірація – сушіння». Проведено розрахунок основних параметрів системи, зокрема продуктивності, швидкості руху повітря та втрат тиску. Обґрунтовано вибір матеріалів і обладнання.

У **четвертому розділі** виконано оцінку економічної та екологічної ефективності запропонованих технічних рішень. Визначено зниження експлуатаційних витрат, термін окупності інвестицій, а також екологічні переваги, пов'язані зі зменшенням пилових викидів і енергоспоживання.

Рекомендації щодо використання результатів роботи: результати можуть бути використані при проектуванні та модернізації елеваторів, а також у навчальному процесі закладів вищої освіти аграрного та технічного профілю.

Сфера застосування результатів роботи елеватори, зерносушильні та зерноочисні комплекси агропромислового виробництва

Текст роботи пройшов перевірку на плагіат за допомогою сервісу Strike Plagiarism, та є оригінальним – 99 %.

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота магістра присвячена удосконаленню комбінованої системи очищення, аспірації та сушіння зерна на елеваторі з метою підвищення її енергоефективності, продуктивності та екологічної безпеки. У роботі проаналізовано сучасні технологічні схеми післязбиральної обробки зерна, обґрунтовано доцільність їх модернізації та запропоновано технічні рішення, спрямовані на оптимізацію повітряних потоків і зменшення втрат тиску в аспіраційній мережі.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: КОМБІНОВАНА СИСТЕМА, ОЧИЩЕННЯ ЗЕРНА, АСПІРАЦІЯ, ЗЕРНОСУШАРКА, ЕЛЕВАТОР, ПІСЛЯЗБИРАЛЬНА ОБРОБКА, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ.

ANNOTATION

The master's qualification work is devoted to improving a combined system for grain cleaning, aspiration, and drying at an elevator in order to increase its energy efficiency, productivity, and environmental safety. The study analyzes modern technological schemes of post-harvest grain processing and substantiates the necessity of their modernization. Technical solutions aimed at optimizing air flows and reducing pressure losses in the aspiration network are proposed.

KEYWORDS: COMBINED SYSTEM, GRAIN CLEANING, ASPIRATION, GRAIN DRYER, ELEVATOR, POST-HARVEST PROCESSING, ENERGY EFFICIENCY.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	9
1.1. Призначення та роль аспіраційних систем у технологічному процесі елеватора	9
1.2. Джерела пиловиділення в зернообробних комплексах	11
1.3. Класифікація аспіраційних систем (локальні, загальнообмінні, комбіновані)	16
1.4. Огляд сучасного обладнання для аспірації	19
1.5. Аналіз недоліків існуючих конструкцій і проблем експлуатації	25
1.6. Вплив конструкції аспіраційної мережі на ефективність очищення	29
1.7. Обґрунтування необхідності вдосконалення конструктивних елементів	32
Висновки до розділу 1	35
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	37
2.1. План проведення експериментальних досліджень	37
2.2. Методика дослідження процесу очищення на повітряно-ситних сепараторах стаціонарних технологічних ліній	40
2.3. Методика лабораторних досліджень	42
2.4. Вимірювальні прилади та обладнання	56
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ	60
3.1. Вибір базової моделі аспіраційної системи елеватора	60
3.2. Концепція удосконалення конструкції	63
3.3. Модернізація окремих вузлів	64
3.4. Розрахунок основних параметрів	71
3.5. Обґрунтування матеріалів і вибір обладнання	77
Висновки до розділу 3	78
РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБКИ	82
4.1. Оцінка екологічного ефекту	82
4.5. Заходи з охорони праці та безпеки (вибухозахист, пожежна безпека)	86
4.2. Розрахунок економічної ефективності:	89
Висновки до розділу	98
ВИСНОВОК ТА ПРОПОЗИЦІЇ	92
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	94

ВСТУП

Аграрний сектор України є одним із ключових напрямів розвитку національної економіки, а ефективність його функціонування значною мірою залежить від рівня технічного оснащення підприємств післязбиральної обробки та зберігання зерна. Україна стабільно посідає провідні позиції у світі за експортом зернових і олійних культур, що потребує постійного вдосконалення інфраструктури елеваторної галузі та забезпечення високої якості зберігання продукції.

Сучасні елеваторні комплекси стикаються з низкою проблем, пов'язаних із пиловиділенням під час транспортування, очищення та сушіння зерна. Надмірна концентрація пилу негативно впливає на санітарні умови виробництва, підвищує ризик вибухонебезпечних ситуацій, знижує якість повітряного середовища, спричиняє додатковий знос обладнання та підвищує енергоспоживання систем. Тому ефективна аспірація є невід'ємною частиною технологічного процесу елеваторів і безпосередньо визначає їхню продуктивність, безпеку та відповідність екологічним і технологічним нормам.

Проте аналіз сучасного стану обладнання на багатьох підприємствах показує, що значна кількість елеваторів експлуатує морально та фізично застарілі системи аспірації, які не відповідають вимогам енергоефективності, не забезпечують достатньої інтенсивності відсмоктування пилу або не враховують особливостей повітропилових потоків, характерних для сучасних високопродуктивних ліній. Низька інноваційна активність галузі та недостатній рівень інвестицій у технічне оновлення стримують потенціал зернопереробних підприємств.

З огляду на це, актуальним є пошук і впровадження конструктивних удосконалень систем аспірації, які дозволять підвищити ефективність відокремлення пилу, зменшити втрати зерна, забезпечити стабільні гідродинамічні параметри повітряного потоку, знизити енерговитрати та підвищити безпеку виробництва.

Модернізація аспіраційних систем передбачає оптимізацію конструктивних параметрів повітропроводів, аспіраційних камер, фільтрувальних апаратів, вузлів забору повітря та обладнання для відокремлення частинок. Особливої ваги

набувають інженерні рішення, що дозволяють зменшити втрати тиску, запобігти самоосаженню пилу, покращити аеродинаміку системи та забезпечити її надійність і енергоефективність.

Зростання обсягів післязбиральної обробки зерна та підвищені вимоги до екологічної безпеки визначають необхідність дослідження шляхів удосконалення конструктивних параметрів аспіраційних систем елеваторів. Це підкреслює актуальність теми даної магістерської роботи та її практичну значущість для підвищення ефективності роботи підприємств зернопереробної галузі.

Мета дослідження – підвищення ефективності функціонування аспіраційної системи елеватора шляхом удосконалення її конструктивних параметрів і оптимізації роботи основних елементів.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

Провести аналіз сучасних систем аспірації елеваторів та визначити їхні конструктивні недоліки.

Дослідити фізико-механічні властивості повітропилових потоків у технологічних процесах елеватора.

Обґрунтувати необхідність модернізації окремих конструктивних елементів аспіраційної системи.

Розробити удосконалену конструкцію або схему аспірації із покращеними аеродинамічними характеристиками.

Виконати розрахунок основних параметрів роботи системи (швидкостей, втрат тиску, продуктивності).

Провести порівняльне моделювання базової та удосконаленої систем і визначити їх ефективність.

Оцінити техніко-економічні та екологічні переваги запропонованих удосконалень.

Об'єкт дослідження. Процеси аспірації повітря на елеваторних комплексах у процесах транспортування, очищення та зберігання зерна.

Предмет дослідження. Конструктивні параметри та аеродинамічні характеристики елементів аспіраційної системи елеватора, що впливають на ефективність вилучення пилу та енергоефективність роботи.

РОЗДІЛ 1.

АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Призначення та роль аспіраційних систем у технологічному процесі елеватора

Аспіраційні системи є важливою складовою технологічного процесу післязбиральної обробки зерна, оскільки вони забезпечують видалення легких домішок, пилу та аерозольних частинок, які утворюються на всіх етапах транспортування, очищення й сушіння. За даними дослідників [1, 3], інтенсивність пиловиділення на елеваторах залежить як від фізико-механічних властивостей зерна, так і від конструктивних особливостей обладнання, що використовують у виробничому процесі.

Під час роботи норій, транспортерів, зерноочисних машин і сушарок виникають значні повітропилі потоки. За відсутності ефективної аспірації це призводить до забруднення повітряного середовища, збільшення втрат зернової маси та створення небезпечних умов праці для персоналу [2]. Крім того, пил є вибухонебезпечним матеріалом, і його накопичення у виробничих приміщеннях підвищує ризик виникнення аварійних ситуацій, зокрема пилових вибухів [4, 7].

Основне призначення аспіраційних систем полягає у створенні контрольованого повітряного потоку, який забезпечує своєчасне та ефективне вилучення дрібнодисперсних часток із зон підвищеного пиловиділення. Як зазначено у працях українських та зарубіжних авторів [5, 8], правильно спроектована система аспірації дозволяє:

- зменшити концентрацію зважених частинок у повітрі до нормативного рівня;
- запобігти вторинному забрудненню зерна;
- знизити знос обладнання, спричинений абразивним впливом пилу;
- підвищити продуктивність технологічних машин;
- забезпечити стабільні санітарно-гігієнічні умови;
- мінімізувати ризики пожеж та вибухів;

- зменшити енерговитрати за рахунок оптимізації повітропроводів та робочих режимів вентиляторів.

Згідно з дослідженнями [3, 6], до 80% загального об'єму пилу на елеваторі утворюється в зонах завантаження та розвантаження, у транспортних магістралях та на виходах із зерноочисних машин. Ефективна аспірація на цих ділянках суттєво покращує якість повітря і зменшує необхідність у проведенні додаткових робіт з очищення приміщень.

Аспіраційні системи виконують також функцію первинного очищення зернової маси. Під дією повітряного потоку від зерна відокремлюються легкі домішки: пил, лузга, дрібні органічні включення. Це дозволяє підвищити ефективність роботи основних зерноочисних машин та зменшити навантаження на них [9]. Важливо, що якісне попереднє очищення значною мірою визначає кінцеві показники якості зерна та його придатність до тривалого зберігання.

Належно організована аспірація сприяє забезпеченню нормативної вологості, чистоти та збереженню товарних властивостей зерна. Як показано в роботах [1, 10], стабільний повітрообмін у системі сприяє усуненню локальних зон підвищеної вологості та запобігає самозігріванню зернової маси, особливо під час активної вентиляції на силосах.

У сучасних елеваторних комплексах аспіраційні системи інтегровані в автоматизовані системи управління, що дозволяє регулювати параметри повітряного потоку залежно від обсягу зерна, режиму роботи обладнання та концентрації пилу в робочій зоні. За даними [6], застосування автоматизованих систем дозволяє зменшити енергоспоживання на 15–25% та підвищити ефективність вилучення пилу до 95%.

Отже, аспіраційні системи відіграють ключову роль у забезпеченні безпечного, екологічно ефективного та технологічно стабільного процесу післязбиральної обробки зерна на елеваторах. Їхнє значення виходить за межі простої очистки повітря — вони є критичним елементом загальної інфраструктури елеватора, що визначає якість, безпеку та економічність роботи всього підприємства.

1.2. Джерела пиловиділення в зернообробних комплексах

Пил при обробці зерна утворюється на всіх стадіях технологічного ланцюга: від прийому та очищення до сушіння, транспортування, зберігання й відвантаження. Рівень пиловиділення залежить від типу культури, вологості зерна, інтенсивності та швидкості технологічних операцій, конструктивних особливостей устаткування і режимів його експлуатації. Надмірна запиленість створює санітарно-гігієнічні проблеми, підвищує коефіцієнт зношування обладнання і є фактором пожежо- та вибухонебезпеки, тому ідентифікація точок генерації пилу — базова передумова для проектування систем аспірації й захисту.

На основі аналітичних звітів і експериментальних досліджень можна виокремити кілька типових місць скупчення та емісії пилу на елеваторі:

Пункти приймання (лотки, воронки приймання, приймальні ями) — при скиданні зерна з автотранспорту й перекиданні утворюються інтенсивні аерозольні вихори; неповне герметизація місць приймання сприяє зриву пилу в приміщення.

Норії, Пункери та підйомні вузли (bucket elevators) — під час підбору й скидання зерна в ковші та при падінні зерна з висоти утворюється значна кількість дрібнодисперсного пилу; багато досліджень показують, що в норіях концентрація та фракційний склад пилу особливо небезпечні.

Точки передачі між транспортуючими елементами (гвинтові конвеєри → повітроводи → транспортні стрічки → воронки, з'єднувальні дифузори) — кожен перехід із зміною напрямку чи швидкості потоку спричиняє локальну генерацію пилу й зрив частинок у повітря.

Зерноочисні та сепарувальні машини — роботи сит, повітряних каналів та циклонів створюють пил і продувають домішки; виходи із цих машин — одна з основних джерел постійних емісій.

Сушарки і викидні вентиляційні канали — під час сушіння від зерна відокремлюються легкі частки; вентиляційні викиди без належної фільтрації дають значні викиди пилу у зовнішнє середовище.

Силоси і бункери при наповненні/спорожненні — під час засипки/вивантаження зерна виникають локальні аерозолі та вібраційні викиди, а також можливі утворення пилових шарів на конструкціях.

Подрібнювальні й шліфувальні одиниці (млини, дробарки) — процеси механічного подрібнення породжують найтонші фракції, що легко тривалий час утримуються в повітрі.

Місця розвантаження/завантаження авто- та залізничного транспорту, ваги та воронки дозування — періодичні цикли зв'язування/пересипання часто супроводжуються спалахами емісії пилу.

Фактори, що визначають інтенсивність пиловиділення:

Фізико-механічні властивості зерна: розмір, форма, крихкість, вміст лушпиння, вологість — впливають на те, скільки часток відокремлюється при механічній обробці.

Технологічні режими: швидкість подачі, висота падіння, частота перервань потоку, режим сушіння.

Стан та конструкція обладнання: зношеність поверхонь, необережні стиковки, негерметичні канали й люки збільшують втрати пилу.

Кліматичні умови: відносна вологість і температура опосередковано впливають на фракційний склад і здатність часток утримуватися в повітрі; проте статистичні дослідження показують, що зв'язок не завжди лінійний і може бути локально різним.

Емісії пилу з зернообробних операцій вимірюються у г/т продукції або у масових концентраціях (mg/m^3). У роботах і звітах наведено широкий діапазон: від кількох грамів на тонну при контрольованих умовах до десятків грамів/тонну при неконтрольованих операціях; конкретні значення залежать від типу операції та культур. Такі дані використовувалися при розробці методологій контролю та при розрахунку емісійних факторів для інвентаризацій повітряних викидів.

Ідентифікація та пріоритезація джерел пилу дають змогу сконцентрувати інженерні заходи там, де вони максимально ефективні: Герметизація приймальних вузлів, локальний захват пилу на точках передачі й норіях, установка

циклонів/фільтрів на сушарках і виходах зерноочисних машин, зниження висоти падіння та оптимізація швидкостей подачі — ці заходи суттєво знижують загальні емісії і підвищують безпеку. Для проектування й обґрунтування модернізації аспіраційної системи корисно опиратися на дані AP-42 (EPA), наукові дослідження USDA/ARS та сучасні огляди з питань пилу й вибухобезпеки.

Очищення повітря на елеваторах та зернообробних підприємствах є критично важливим елементом технологічної безпеки, оскільки пил зернових культур належить до вибухонебезпечних проколів органічного походження, які при утворенні певних концентрацій здатні спричинити руйнівні вибухи. Крім того, мікрочастинки пилу негативно впливають на умови праці та здоров'я персоналу. Тому системи аспірації та фільтрації повинні відповідати встановленим державним і міжнародним нормам щодо допустимих рівнів запиленості, вибухобезпеки та екологічних показників.

Нормативні документи, що регламентують вимоги до аспірації та очищення повітря:

1. ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування» — встановлює вимоги до розрахунку повітрообміну, параметрів вентиляційних систем та організації повітряного середовища у виробничих приміщеннях.

2. ДСТУ EN 12779:2016 «Безпечність машин для оброблення зернових. Системи аспірації та пневмотранспорту» — визначає вимоги до безпеки аспіраційних установок, пиловловлювальних апаратів та пневмотранспортних систем.

3. ДСТУ EN 143; EN 13274 — вимоги до фільтрувальних апаратів для уловлювання дрібнодисперсного пилу.

4. ATEX Directive 2014/34/EU та 1999/92/EC — міжнародні директиви щодо експлуатації обладнання у вибухонебезпечних середовищах.

5. НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні» — визначають вимоги до запобігання пилових вибухів на підприємствах агропереробки.

Гранично допустимі концентрації пилу

Пил зернових культур класифікується як пил органічного походження з вибуховим потенціалом, тому допустимі рівні його вмісту в повітрі робочої зони суворо регламентовані.

Гранично допустимі концентрації (ГДК) відповідно до нормативних документів: пил органічний (зерновий): ГДК = 4 мг/м³ (у робочій зоні при тривалому впливі); пил змішаний (органічний + мінеральний): ГДК = 2–6 мг/м³, залежно від фракційного складу; пил, який містить мікотоксини або спори грибів: ГДК = 0,5 мг/м³.

Перевищення цих норм призводить до порушення санітарно-гігієнічних умов праці, збільшення ризику захворювань органів дихання та високої ймовірності пилових вибухів.

Вимоги до ефективності аспіраційних систем

Для забезпечення нормативного стану повітряного середовища аспіраційні системи повинні відповідати таким вимогам:

1. Мінімальна ефективність уловлювання пилу

- циклонні апарати – 70–85 %,
- мультициклонні батареї – 85–90 %,
- рукавні фільтри – 95–99,8 %,
- електрофільтри – до 99,9 % (для дрібнодисперсних фракцій < 10 мкм).

У сучасних елеваторах найчастіше застосовують рукавні фільтри та мультициклонні системи, які забезпечують високий ступінь очищення навіть при великих повітряних витратах.

Вимоги вибухобезпеки

Згідно з директивами АТЕХ, пилові середовища зернопереробки належать до категорії Zone 21 та Zone 22 (вибухонебезпечні зони). Вимоги включають:

1. Заземлення та вирівнювання потенціалів усіх металевих елементів аспіраційної системи.

2. Застосування вибухозахищеного електрообладнання.
3. Використання вибухорозрядних панелей, мембран та вибухових клапанів.
4. Заборона використання повітропроводів, у яких можливе осідання пилу у мертвих зонах.

5. Швидкість повітря у трубопроводах – мінімум 18–22 м/с, щоб уникнути утворення пилових відкладень.

6. Локальні укриття повинні гарантувати герметичність і стабільність тяги.

Ці вимоги суттєво впливають на конструктивні параметри аспіраційних систем та підходи до їх модернізації.

- Вимоги екологічної безпеки

Елеватори належать до об'єктів з підвищеним впливом на довкілля, тому вимоги до викидів атмосферного повітря регламентуються:

- ЗУ «Про охорону атмосферного повітря»,
- ДСТУ ISO 4225,
- ДСП 201-97,
- Методикою розрахунку викидів пилу при обробці зерна (МОН України).

Основні вимоги:

- викиди після фільтрів не повинні перевищувати 50 мг/м³ для органічного пилу;
- при застосуванні вискоелективних рукавних фільтрів – 10 мг/м³ (європейський стандарт EN 143).
- фільтрувальні станції повинні працювати у режимі мінімізації вторинних викидів;
- необхідно забезпечувати утилізацію уловленого пилу (повернення у кормові або паливні суміші).

Вимоги до безпечних умов праці персоналу

Згідно з ДСТУ EN 689, ГОСТ 12.1.007 та НПАОП 0.00-1.28:

1. Персонал повинен мати доступ до засобів індивідуального захисту (респіратори FFP2 або FFP3).

2. Доступ до вибухонебезпечних зон – тільки після повної зупинки аспіраційної системи.

3. Регулярний контроль запиленості робочої зони та періодична атестація робочих місць.

4. Обов'язкове технічне обслуговування фільтрів, циклона та трубопроводів.

5. Очищення обладнання від відкладень пилу – не рідше 1 разу на 7–10 днів.

Отже, вимоги до очищення повітря та безпеки на елеваторах визначають необхідність застосування високоефективних аспіраційних систем, здатних забезпечити зниження запиленості до нормативних значень, запобігти утворенню вибухонебезпечних концентрацій пилу та мінімізувати негативний вплив на персонал і довкілля. Дотримання встановлених стандартів є обов'язковою передумовою безпечної та енергоефективної роботи зернообробних підприємств.

1.3. Класифікація аспіраційних систем (локальні, загальнообмінні, комбіновані)

Аспіраційні системи, що застосовуються на елеваторах та зернообробних підприємствах, поділяють за призначенням, масштабом дії, способом вилучення забрудненого повітря та його подальшої очистки. Найбільш поширеною є класифікація за зоною обслуговування та способом організації повітрообміну, згідно з якою виділяють локальні, загальнообмінні та комбіновані системи аспірації. Такий підхід використовується у вітчизняній та міжнародній інженерній практиці, зокрема у рекомендаціях ДСТУ, EN 12779, а також у нормативних документах з проєктування промислової вентиляції (ДБН В.2.5-67:2013, ГОСТ 12.4.021-75).

Локальні аспіраційні системи

Локальна аспірація спрямована на вилучення пилу безпосередньо в зоні його утворення. Цей тип систем дозволяє запобігти потраплянню пилових частинок у виробничий простір шляхом точкового захоплення повітря.

Основні характеристики:

Забезпечують локальний відсмокт повітря у місці контакту зерна з обладнанням.

Використовують повітрязбірні патрубки, укриття, витяжні зонти, кожухи, які монтують біля вузлів генерації пилу (норії, очисні машини, точки пересипання, дробарки).

Функціонують у комплексі з трубопроводами, циклонними установками, рукавними фільтрами або мультициклонними батареями.

Переваги: максимальна ефективність вилучення пилу; Мінімальні витрати енергії та повітряобміну порівняно з загальнообмінними системами; зниження вибухонебезпечних концентрацій пилу безпосередньо в обладнанні.

Недоліки: вимагають якісного проектування локальних укриттів; потрібний точний підбір повітряної продуктивності для уникнення «підсмоктування» надлишкового повітря.

Приклади застосування: норії та головки норій; барабанні та ситові очисники; точки пересипання з конвеєра на конвеєр; завантажувальні та розвантажувальні вузли силосів.

Загальнообмінна (загальновентиляційна) аспірація призначена для видалення запиленого повітря з усього приміщення, де виконується технологічний процес.

Основні характеристики: забезпечують повітрообмін у великому об'ємі — робочих зонах елеватора, цехах попереднього очищення, зерносховищах; використовують приточно-витяжні установки, венткамери, шахти, системи регульованого повітропостачання; не усувають пил у місці його утворення, але підтримують допустимі концентрації пилу у зоні перебування персоналу.

Переваги: стабілізація мікроклімату та забезпечення нормованих показників повітряного середовища; зниження пилового навантаження на всій площі приміщення; працюють як резервний елемент при відмові локальної аспірації.

Недоліки: низька ефективність у боротьбі з локальними джерелами пилу; потребують великих обсягів повітря та енергії; не здатні запобігати вибухонебезпечним пиловим концентраціям у технологічному обладнанні.

Приклади застосування: зерносклади та складські приміщення; приміщення сушарок; цехи первинної очистки; великі приймальні та сортувальні зони.

Комбіновані системи поєднують локальну та загальнообмінну аспірацію, що дозволяє досягти максимального рівня очищення повітря і безпеки технологічного процесу. Такий підхід є найбільш ефективним для сучасних елеваторів, особливо при роботі з кукурудзою та іншими культурами з високою пиловатістю.

Особливості комбінованої схеми: локальна аспірація захоплює пил у місці його утворення; загальнообмінна вентиляція видаляє фоновий пил, який все ж потрапив у приміщення; обидві системи можуть працювати узгоджено через централізовані фільтраційні станції та мережі повітропроводів.

Переваги: найвищий рівень безпеки для персоналу і обладнання; забезпечення нормативної запиленості навіть у складних режимах роботи; можливість гнучкого керування повітряними потоками.

Недоліки: висока вартість реалізації; ускладнена експлуатація та необхідність регулярного технічного обслуговування; складність проектування повітропроводів та балансування системи.

Сфери застосування: великі елеватори та комплекси сушіння; зерноочисні цехи; вузли пересипання з інтенсивними потоками; комбікормові та переробні підприємства.

Отже, класифікація аспіраційних систем на локальні, загальнообмінні та комбіновані дозволяє оптимально підібрати схему повітроочищення залежно від особливостей технологічного процесу, конструкції елеватора та характеристик

пилу. Удосконалення конструктивних параметрів аспіраційної системи передбачає раціональне поєднання цих типів із урахуванням витрати повітря, ефективності фільтрації та енергетичних показників.

1.5. Огляд сучасного обладнання для аспірації

На сучасних зернообробних підприємствах аспіраційне обладнання відіграє надзвичайно важливу роль: він не лише забезпечує очищення повітря від пилової домішки, а й підвищує безпеку, знижує втрати зерна, зменшує знос обладнання. Нижче — огляд найбільш поширених і ефективних типів аспіраційного обладнання, а також сучасні рішення, які використовуються на елеваторах.

1. Основні типи аспіраційного обладнання

1 Циклонні сепаратори (циклонні пиловловлювачі) – це відцентрові пристрої, які використовують силу інерції та центробіжні сили для первинного відділення крупніших частинок пилу від повітряного потоку. Вони часто використовуються як попередній ступінь очищення: спочатку великі частинки «відпадають» в циклоні, а потім вже очищене повітря йде на тонше фільтрування. Наприклад, компанія Agtison пропонує відцентрові пиловловлювачі, ефективність яких може становити ~ 70-80 % для зернового пилу. Циклонні пристрої відрізняються простою конструкцією, надійністю, низькими витратами на обслуговування.

- Рукавні (тканеві) фільтри - один із найефективніших способів очищення повітря: повітря проходить через тканинні «рукава» (фільтрувальні елементи), які затримують навіть дрібні частинки пилу. Наприклад, рукавний фільтр ZEO-FCS має продуктивність від ~4 500 до 50 000 м³/год і ефективність очищення до 99,6%.

Компанії-виробники підбирають матеріал рукавів залежно від середовища: поліестер, PTFE, інші спеціальні тканини. Для очищення рукавів часто використовується імпульсна продувка стисненого повітря (pulse-jet), що забезпечує ефективну регенерацію фільтруючих елементів.

2 Комбіновані фільтри «циклон + тканина». Такі установки поєднують циклонну сепарацію й тканевий («рукавний») фільтр. Спочатку в циклоні відокремлюються грубі частинки, а потім повітря проходить через тканину. Це знижує навантаження на фільтрувальні рукава, подовжує термін їх служби та підвищує загальну ефективність системи. Наприклад, компанія Greenex-ECO описує циклофільтри серії VCF, які мають саме таку конструкцію: механічний попередній поділ + тканинна фільтрація з імпульсною регенерацією. [Greenex ECO](#)

2. Сепаратори / зерноочисні машини з вбудованими циклонами. Наприклад, сепаратор САД-4 від НВП «Аеромех» має вбудований циклон: це дає змогу не лише сортувати зерно, а й здійснювати аспірацію одночасно. Такі рішення економлять простір, знижують кількість окремих пристроїв і можуть бути більш енергоефективними.

Системи централізованої аспірації. Це складні системи, які поєднують багато точок збирання пилу (луни, конвєсери, норії тощо) в єдину мережу повітропроводів із фільтрувальними блоками та великими вентиляторами.

Компанія SKIF Technology Group через свого партнера Start-UP пропонує такі системи для зернопереробних підприємств. Переваги: централізований контроль, зменшення кількості окремих фільтрів, можливість регенерації фільтра і повернення очищеного повітря в цех (оптимізація теплових втрат).

Ротаційні живильники / заслінки (rotary airlocks або rotary feeders) - це компоненти, які часто входять у системи аспірації: вони дозволяють передавати зерно чи пилоповітряну суміш з одного устаткування в інше (наприклад, із циклона до силосу) під тиском або вакуумом. Ротаційні живильники також допомагають підтримувати герметичність системи аспірації, що є критично важливим для безпеки (запобігання витокам пилу й ризику вибуху).

До інноваційних підходів у системі аспірації можна віднести розробку «нового покоління фільтрів», які базуються на багатьох запатентованих рішеннях. Серед таких моделей — фільтр дихаючий (ZEO-FB), фільтр-шафа (ZEO-FW), виробником яких є компанія Grain Capital / ZEO.

Підхід до енергоефективності: за даними Agro Proff, сучасні системи аспірації оптимізуються таким чином, що з одного фільтра можна обслуговувати багато точок захвату пилу, що знижує кількість вентиляторів і загальне енергоспоживання.

Інжиніринг та кастомні рішення: компанії-інтегратори, як Filcon, пропонують «під ключ» проектування систем аспірації, з урахуванням обсягу пиловиділення і безпеки.

Найвідомішими на сьогодні в сфері аспіраційного обладнання, які найчастіше зустрічаються на ринку елеваторного обладнання, залишаються такі установки:

- НМС-180 Bag-House Cyclone Dust Collector — це багатоступенева установка: циклон + тканинні фільтри; використовується для промислової аспірації з великим обсягом повітря, має систему імпульсної очищення фільтрів.
- Bag Filter + Cyclone Dust Collector — універсальний фільтр, який можна конфігурувати під конкретні задачі з очищення запиленого повітря, дозволяє досягти високій ефективності фільтрації.

Аналіз технічних характеристик цього обладнання показав, що перевагами є висока ефективність очищення – сучасні тканинні фільтри (рукава) досягають дуже високих показників уловлювання пилу; зменшене енергоспоживання – централізовані системи й інноваційні рішення дозволяють оптимізувати вентиляцію; гнучкість конфігурації – модульні фільтри, можливість комбінування циклону й тканинних елементів; підвищена безпека – сучасне обладнання може бути сертифіковане за АТЕХ, містити засоби захисту від вибуху, герметизацію, ротатійні вхідні заслінки.

Разом із цим, перед компаніями стоїть ряд викликів, які потрібно долати при реалізації проектів з монтажу даного обладнання. Передусім це вартість – встановлення сучасних багатоступневих систем (циклон + тканина) часто потребує значних капіталовкладень. Також, важливо враховувати особливості системи монтажу та налаштування – потрібен якісний інжиніринг, щоб підібрати правильні габарити повітроводів, вентиляторів, фільтрів. Використання тканинних

фільтрів потребує періодичної регенерації, очищення, заміни рукавів; якщо система неправильно змонтована, може бути недостатня тяга або витік пилу.

Отже, сучасне обладнання для аспірації зернопереробних підприємств включає широкий спектр рішень: від простих циклонних сепараторів до складних багатоступневих фільтрувальних систем із імпульсною регенерацією. Інтеграція таких систем є критичною для забезпечення екологічної безпеки, підвищення продуктивності та продовження терміну служби технологічного обладнання.

Розвиток технологій аспірації прямо корелює з підвищенням стандартів безпеки, зменшенням викидів та впровадженням енергоефективних рішень, що робить цей напрям надзвичайно актуальним для модернізації елеваторів та зернопереробних комплексів.

Екологічні вимоги порушуються не лише використанням перевалочної або потоково-перевалочної технології, яка призводить до того, що зернівки після обробки стають більш забрудненими, ніж до обробки, але й застосуванням машин із замкнутим циклом пневмосепаруючої системи та відкритими аспіраційними системами.

Технічний стан зернопереробних господарств у частині післязбиральної обробки та зберігання зерна та насіння наразі знаходиться на вкрай низькому рівні та продовжує погіршуватися. Щодо динаміки оснащення, то за останні два роки, згідно з даними перепису 2017 року, сільськогосподарські підприємства придбали 44,8% техніки, а фермерські господарства — 24,3% від кількості наявних машин [9].

Таким чином, подальше зниження рівня забезпеченості господарств технікою для післязбиральної обробки зумовлено значним перевищенням кількості машин, що вибувають з експлуатації, порівняно з кількістю придбаних нових одиниць техніки.

1.4. Аналіз недоліків існуючих конструкцій і проблем експлуатації

Незважаючи на наявність технічних рішень для аспірації, на практиці елеватори часто стикаються з проблемами, що знижують ефективність систем, підвищують витрати, ризики для безпеки та погіршують екологічні показники. Нижче — перелік типових недоліків з поясненням причин, наслідків і рекомендаціями.

1) Неправильне проєктування та монтаж (помилки в геометрії повітропроводів, невірні розміри, неврахування втрат тиску)

Опис проблеми: повітроводи, коліна й переходи неправильно розраховані — виникають мертві зони, великі втрати тиску або надлишкова турбулентність.

Причини: недостатній інжиніринг, застосування шаблонних діаметрів без розрахунку реального повітряного потоку, неякісні перехідні частини.

Наслідки: зниження захоплення пилу у локальних зонах, підвищене енергоспоживання вентиляторів, збільшення осідань пилу й ризик засмічення.

Заходи: виконувати повноцінний гідравлічний розрахунок мережі; уникати різких зменшень/збільшень перерізу; застосовувати плавні дифузори й фасонні елементи; балансувати систему при пуску.

Джерело/доказ: проблеми через поганий монтаж і розробку широко зафіксовані в оглядах по baghouse та вентиляції.

2) Недостатній локальний захват пилу (погано оформлені укриття, неефективні капоти, відсутність місцевих витяжок)

Опис проблеми: аспірація «капає» на загальновентиляцію, тоді як найбільш ефективний метод — захоплення у джерела.

Причини: економія коштів при монтажі, відсутність правильної ідентифікації «гарячих точок» пиловиділення.

Наслідки: значні фонові концентрації пилу в приміщенні, підвищення ризику для здоров'я персоналу та вибуху.

Заходи: розробити локальні укриття, застосувати точкові рукавні захвати/капоти на вузлах пересипання і норіях; інтегрувати локальну і загальнообмінну аспірацію. Національна академія наук

3) Невідповідний вибір фільтрів або медіа; передчасна деградація рукавів

Опис проблеми: використання не підходящого фільтрувального матеріалу або неправильний режим регенерації (імпульсна продувка) призводить до швидкого зношення рукавів.

Причини: вибір стандартного матеріалу без урахування вологості/температури/хімічного складу пелюку; агресивна імпульсна очистка при неправильних параметрах.

Наслідки: зниження ефективності уловлювання, підвищені викиди, часті заміни фільтрувальних елементів і витрати на сервіс.

Заходи: підбирати медіа під експлуатаційні умови (вологість, абразивність), впроваджувати моніторинг перепаду тиску, оптимізувати стратегію продувок.

4) Надмірний перепад тиску і енергетичні втрати (високі витрати енергії)

Опис проблеми: погано оптимізовані циклонні блоки або фільтри викликають великий опір системи — вентилятори працюють на межі, зростає енергоспоживання.

Причини: невірний підбір вентиляторів, завищені швидкості, клапани/заслонки у некоректних положеннях, засмічення фільтрів.

Наслідки: підвищені експлуатаційні витрати, часті відмови обладнання.

Заходи: аналіз кривих вентилятор–мережа, регулярний моніторинг перепаду тиску, корекція швидкостей і періодичне очищення/оновлення елементів.

5) Провали у технічному обслуговуванні (недотримання регламентів, брак кваліфікації персоналу)

Опис проблеми: рідкісне чищення циклонів і фільтрів, неналежне відстеження стану ущільнень і засувов.

Причини: економія на сервісі, відсутність плану ТО, брак навчання персоналу.

Наслідки: зниження продуктивності системи, підвищення викидів, ризику аварій.

Заходи: розробити та впровадити графік ТО, інструкції з діагностики, навчання персоналу; впровадити показники КРІ (ΔР, продуктивність вентиляторів).

6) Накопичення пилу і самоосадження у повітропроводах (мертві зони, низькі швидкості)

Опис проблеми: у відгалуженнях або зонах зі зниженим швидкісним режимом частинки осідають, утворюють пробки і джерела вторинного пилу.

Причини: некоректна розводка мережі, занадто великі перерізи, низька швидкість повітря (<18–22 м/с у вибухозонних системах).

Наслідки: ризик пожеж/вибухів, втрати пропускної здатності, збільшення необхідності очищення.

Заходи: забезпечити мінімальні робочі швидкості, застосовувати нахили та самопромивні ділянки, проектувати труби без горизонтальних ділянок, де можливе осідання.

7) Недостатні заходи вибухозахисту (відсутність вентиляційних мембран, заземлення, вибухозахищене обладнання)

Опис проблеми: багато систем встановлені без урахування вимог АТЕХ/NFPA: відсутні вибухові клапани, мембрани, система заземлення.

Причини: ігнорування регламентів, бажання зменшити витрати на додаткові елементи захисту.

Наслідки: підвищений ризик пилових вибухів і руйнувань.

Заходи: класифікація зон, встановлення вибухозахищеного обладнання, вибухових клапанів/панелей, контроль заземлення й регулярна перевірка системи.

8) Неefективна інтеграція систем збору і утилізації уловленого пилу

Опис проблеми: зібраний пил не повертають у технологічний цикл або не утилізують правильно; часто пил просто викидають або неправильно зберігають.

Причини: брак рішень з повторного використання, відсутність окремих бункерів/шлюзів, брак процедур.

Наслідки: додаткові викиди при обслуговуванні, втрата цінної сировини, екологічні проблеми.

Заходи: передбачити шлюзові клапани, системи поворотного повернення у технологічний потік або безпечну утилізацію/переробку пилу.

9) Нестача моніторингу і автоматки (відсутність сенсорів запиленості, ΔP , відсутність SCADA)

Опис проблеми: робота «за відчуттями», без реального контролю показників, що ускладнює діагностику й профілактику.

Причини: економія на системах моніторингу, низька ступінь автоматизації.

Наслідки: пізні виявлення відхилень, непродуктивні налаштування, підвищені викиди.

Заходи: впровадити датчики запиленості, ΔP на фільтрах, контрольні датчики витрати повітря, інтегрувати у SCADA для віддаленого моніторингу та історії подій.

10) Економічні і організаційні бар'єри до модернізації

Опис проблеми: високі капітальні витрати на сучасні системи, відсутність інвестицій та стратегій оновлення.

Причини: обмежені бюджети, недостатнє усвідомлення економічного ефекту від модернізації.

Наслідки: затримка у впровадженні енергоефективних рішень, довготривалі експлуатаційні втрати.

Заходи: виконати ТЕО/розрахунок окупності (з урахуванням економії енергії, зменшення втрат зерна, зниження ремонтів), шукати державні/інвестиційні програми підтримки.

1.5. Вплив конструкції аспіраційної мережі на ефективність очищення зернового матеріалу

Аспіраційна мережа є ключовим елементом технологічних ліній очищення та сушіння зерна, оскільки саме її конструктивні параметри визначають характер руху повітряного потоку, інтенсивність розділення фракцій і загальну ефективність виділення легких домішок та пилу. Рационально спроектована система повітропроводів, коробів, камер та решіт забезпечує стабільні аеродинамічні умови, рівномірний розподіл повітря і мінімальні втрати тиску. Натомість конструктивні недоліки спричиняють підсмоктування холодного повітря, нестабільність швидкості, зниження ефективності сепарації та нерівномірність обробки зерна по перетину.

Конструктивні особливості коробів та сушильних камер

Як встановлено в аналізованих конструкціях прямоточних та рециркуляційних шахтних сушарок, основним фактором, який визначає умови проходження повітря через шар зерна, є схема розташування підвідних (+) та відвідних (-) коробів. Саме від неї залежить товщина шару зерна, інтенсивність продування та рівномірність тепломасообміну.

За результатами експериментально-аналітичного дослідження (розділ 2.pdf):

- у варіанті 1 товщина шару дорівнює -кроку ряду коробів у вертикальній площині - (для сушарок типу ДС — близько 200 мм);
- у варіанті 2 товщина шару дорівнює -горизонтальному кроку коробів - (100 мм).

У першому випадку шар зерна піддається суцільному впливу агента сушіння по всьому об'єму, тоді як у другому випадку продування має імпульсний характер, а напрям руху повітря періодично змінюється. Такі зміни конструкції формують різні режими руху повітря та різний ступінь проникнення його у шар зерна.

Це безпосередньо впливає на ефективність видалення легких фракцій, оскільки інтенсивність дії потоку в рециркуляційних сушарках змінюється залежно від положення коробів, а умови руху повітря значно неоднорідні.

Повітропроводи, їх форма та аеродинамічна рівномірність потоку

Ефективність аспіраційної мережі значною мірою залежить від геометричних параметрів повітропроводів :

- перерізу;
- довжини;
- кількості та радіусів поворотів;
- наявності звужень і розширень;
- форми перехідних ділянок.

Нерівномірність швидкості повітря у каналах призводить до:

- локальних зон застою повітря;
- перенавантаження окремих каналів;
- нерівномірного видалення пилу по тракту;
- зниження загальної ефективності повітряного розподілення.

Конструктивні особливості камер визначають характер руху повітря в робочому просторі:

- при надто вузьких каналах відбувається прискорення повітря та надмірне винесення зерна;

- при надто широких каналах виникає зниження швидкості та випадання пилу в зоні, де його відокремлення є небажаним;

- на поворотах повітропроводів створюється додатковий опір та турбулентність, що впливає на стабільність потоку.

Вплив конструкції решіт і пиловидільних каналів

Решета, перегородки та канали для відведення пилу формують первинний поділ частинок за крупністю та аеродинамічними властивостями. У наведених конструкціях сушарок та аспіраційних трактів (розділ2.pdf):

- решітні перегородки виконують функцію рівномірного розподілу повітряного потоку;

- пиловидільні канали виносять легкі фракції в залежності від швидкості та напрямку руху агента сушіння;

- конструкція каналів визначає стабільність руху пилоповітряної суміші у вертикальному та горизонтальному напрямках.

Особливо важливою є сталість швидкості у пиловідвідних каналах, оскільки її коливання спричиняє або випадання пилу в каналі (при зниженні швидкості), або втрати повноцінного зерна (при надмірному прискоренні).

На основі аналізу конструктивних рішень можна сформулювати такі закономірності:

Чим рівномірніше розташовані підвідні та відвідні короби, тим стабільнішим є режим руху повітря, і тим ефективніше відбувається видалення легких домішок.

Імпульсні та реверсивні схеми руху повітря можуть підвищувати ефективність очищення за рахунок чергування зон активного та пасивного продування.

Зміна товщини шару зерна (100 мм або 200 мм) визначає гідродинаміку потоку та якість поділу фракцій.

Надмірна довжина або складна конфігурація повітропроводів призводить до збільшення опору та дисбалансу повітря у різних гілках мережі.

Недостатнє вирівнювання потоку у решітних та розподільних елементах знижує селективність відокремлення пилу.

Відсутність регулювання у каналах створює ризик «підсмоктування паразитного повітря», що зменшує ефективність очищення та стабільність режиму.

Отже, конструкція аспіраційної мережі є визначальним чинником якості очищення зернового матеріалу на стаціонарних лініях. Схема розташування коробів, геометрія повітропроводів, форма пиловідільних каналів, рівномірність руху повітря та можливість регулювання параметрів визначають інтенсивність видалення домішок, стабільність перебігу процесу та енергоефективність роботи

обладнання. Отже, оптимізація конструктивних елементів аспіраційних систем є ключовою умовою підвищення ефективності зерноочисних процесів.

1.6. Обґрунтування необхідності вдосконалення конструктивних елементів аспіраційних та повітророзподільних систем

Конструктивні елементи аспіраційних систем і повітропроводів відіграють ключову роль у забезпеченні стабільного руху повітря та ефективного відокремлення легких домішок, пилових частинок і фракцій зернової маси. Однак аналіз сталих конструкцій, наведених у досліджуваних джерелах, свідчить про наявність низки суттєвих недоліків, які обмежують продуктивність та однорідність процесів очищення. Саме ці недоліки зумовлюють об'єктивну потребу у вдосконаленні конструктивних елементів.

1. Нерівномірність руху повітря у повітропроводах та камерах

За результатами аналітичного огляду конструкцій шахтних сушарок (стор. 18–21), розподіл повітряного потоку значною мірою залежить від:

- місця та схеми розташування підвідних (+) та відвідних (–) коробів;
- форми та розмірів каналів;
- наявності прямих і криволінійних ділянок повітропроводів;
- перерізів повітропроводів, які часто змінюються по ходу каналу.

Встановлено, що різкі зміни траєкторії потоку призводять до появи додаткових зон підвищеного опору і турбулізації. Це викликає феномен надмірного прискорення потоку у вузьких зонах, що збільшує винесення зерна; зниження швидкості у розширених або горизонтальних ділянках, що спричиняє випадання пилу там, де це небажано.

Така нерівномірність веде до зменшення ефективності очищення та нестабільності аеродинамічного режиму, що вимагає оптимізації геометрії каналів.

2. Обмеження, пов'язані з товщиною зернового шару

На сторінках 15–16 наведено два конструктивні варіанти, у яких товщина шару визначена кроком розташування коробів: 100 мм — при горизонтальному розміщенні; 200 мм — при вертикальному розміщенні.

Ці значення не завжди є оптимальними, оскільки надто товстий шар зменшує рівномірність продування; надто тонкий збільшує витрати повітря та енергоресурсів; нерівномірність руху повітря через шар змінюється залежно від його товщини та структури.

Таким чином, жорстка прив'язка геометрії до кроку коробів обмежує можливості регулювання та потребує удосконалення.

3. Відсутність можливості оперативного регулювання повітряного потоку

Хоч у файлі -розділ2.pdf - прямо не згадується ЦВС, виявлені проблеми аналогічні недолікам класичних нерегульованих повітророзподільних систем: швидкість повітря змінюється залежно від висоти каналу; виникає «розбалансування» потоків між гілками; немає стабільного тиску в кожній зоні; система не компенсує зміну опору при забрудненні решіт або каналів. Це створює умови для: нестабільності процесу очищення; нерівномірного видалення пилу; підсмоктування зовнішнього повітря; надлишкового енергоспоживання.

Відсутність регулюючих пристроїв у поєднанні з фіксованою геометрією каналів обґрунтовує необхідність введення:

- дроселюючих заслінок;
- адаптивних повітророзподільних клапанів;
- перепускних каналів;
- геометрично оптимізованих зон вирівнювання потоку.

Недостатня ефективність виділення пилу у пиловидільних каналах

Конструкція пиловидільних каналів має істотний вплив на винесення легких часток; рівномірність очищення у вертикальному перерізі; стабільність розділення зернових і пилових фракцій.

Проте існуючі рішення: допускають передчасне осідання пилу в каналах; створюють надмірний перепад тиску при різких переходах; мають надто малий або надто великий переріз, що порушує аеродинамічний баланс.

Висока чутливість до зміни швидкості потоку підтверджує потребу:

- удосконалення форми перерізів;
- введення компенсуючих конусних вставок;
- усунення різких переломів траєкторії потоку.

5. Енерговитрати як індикатор конструктивної недосконалості

Таким чином для забезпечення необхідної швидкості повітря система змушена працювати на підвищених обертах вентилятора; при цьому частина повітря не бере ефективної участі у тепло- та масообміні; зростають енергетичні втрати.

Енергетична неефективність конструкції є одним із найважливіших аргументів на користь її модернізації.

Отже, аналіз конструктивних рішень, наведених у PDF (стор. 15–16 та 18–21), показує, що існуючі аспіраційні та повітророзподільні системи мають низку обмежень, пов'язаних із нерівномірністю руху повітря, відсутністю можливостей регулювання, недосконалістю пиловидільних каналів та геометричними особливостями коробів і сушильних камер.

Ці недоліки призводять до:

- зниження ефективності очищення,
- збільшення енергетичних витрат,
- нестабільності процесу,
- втрати частини повноцінного зерна.

Отже, вдосконалення конструктивних елементів аспіраційної мережі є необхідною умовою підвищення ефективності роботи зерноочисних і зерносушильних машин.

Висновки до розділу 1

1. Аналіз сучасного стану зернопереробних підприємств показав, що на багатьох елеваторах та зерноприймальних пунктах експлуатуються технологічні лінії очищення і сушіння зерна, конструктивні рішення яких були розроблені

кілька десятиліть тому та не повною мірою відповідають сучасним вимогам енергоефективності, екологічної безпеки й якості післязбиральної обробки зерна.

2. Встановлено, що, незважаючи на появу нових типів обладнання, базові фізичні принципи процесів очищення, аспірації та сушіння зерна залишаються незмінними. Ключову роль у комбінованих системах відіграють повітряні потоки, які одночасно забезпечують відокремлення легких домішок, транспортування пилу та тепломасообмін під час сушіння зерна.

3. Продуктивність і якість роботи систем очищення та сушіння зерна суттєво залежать як від конструктивних параметрів обладнання (геометрії аспіраційних каналів, сушильних камер, повітроводів, живильників), так і від властивостей зернового матеріалу, що надходить у технологічну лінію (вологість, засміченість, гранулометричний склад).

4. Вхідні параметри зернового матеріалу, який подається на сушарку, значною мірою формуються на етапах попереднього та основного очищення. Недостатня ефективність аспірації та нерівномірність подачі зерна призводять до нестабільних режимів сушіння, підвищених енерговитрат і зниження якості готової продукції.

5. Підвищення ефективності комбінованих систем очищення та сушіння зерна можливе шляхом їх конструктивної модернізації, спрямованої на оптимізацію повітряних трактів, зменшення гідравлічних втрат, стабілізацію швидкості повітря та рівномірності подачі зерна до сушильних і аспіраційних зон.

6. Зниження травмування зерна, втрат повноцінної продукції та підвищення експлуатаційної надійності обладнання досягається шляхом застосування сучасних конструкційних і зносостійких матеріалів, а також удосконалення вузлів подачі й розподілу зерна в системах очищення та сушіння.

7. Проведений аналіз підтверджує доцільність розроблення та дослідження удосконаленої комбінованої системи очищення, аспірації та сушіння зерна, що забезпечує підвищення продуктивності, зменшення енерговитрат і поліпшення якості післязбиральної обробки зерна, що й визначає актуальність подальших експериментальних досліджень.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. План проведення експериментальних досліджень

Метою експериментальних досліджень є встановлення особливостей процесу очищення зерна на повітряно–ситних сепараторах у стаціонарних технологічних лініях та визначення ступеня травмування зернового матеріалу при використанні пластикових сит. Дослідження виконувалися з урахуванням реальних технологічних умов, а також вимог до моделювання руху повітряного потоку та взаємодії зерна з робочими елементами обладнання.

План експерименту включав такі етапи:

1. Визначення умов, що забезпечують подібність технологічного процесу. Перед проведенням лабораторних досліджень були встановлені параметри, які повинні відповідати реальним умовам роботи повітряно–ситних сепараторів: форма та розміри повітропроводів, схема підведення та відведення повітряного потоку, товщина шару зерна, швидкість руху повітря, температура та вологість зернової маси.

2. Підготовка зернового матеріалу. Для досліджень використовували зерно пшениці продовольчого призначення, відібране за фракційним складом. Маса наважок, вологість і початковий стан зерна визначалися перед початком експерименту.

3. Підготовка установки. Для експериментів було підготовлено установку з вентилятором, регулятором подачі повітря, ротаметром, манометром, теплоізованими касетами з сітчастими перегородками, термометрами та термопарами для контролю параметрів середовища.

Швидкий і рівномірний нагрів досліджуваного зерна до заданої температури здійснювався у фонтануючому шарі в касеті (10). Нагрівання повітря та його підведення в касету виконувалося за допомогою електрокалорифера (11) і вентилятора (13). Регулювання та контроль швидкості агента сушки в касеті проводилися за допомогою заслінки у всмоктувальному отворі вентилятора, діафрагми (12) та U-подібного манометра (14). Регулювання температури агента сушки здійснювалося за допомогою струмкового реле (5) і контактного термометра, встановленого під касетою (10).

Зволоження повітря, що використовувалося під час сушіння та охолодження, здійснювалося за допомогою водяного термостата, під'єданого до вхідного отвору вентилятора (1). Задане вологовміст повітря підтримувалося автоматично — терморегулятором і контактними термометрами (останні використовувалися для контролю температури як сухого та вологого термометрів).

Температуру та відносну вологість зовнішнього повітря визначали за показами аспіраційного психрометра Ассмана.

Контроль температури нагрівання зерна в касеті (10) здійснювався за температурою відпрацьованого агента сушки за допомогою потенціометра (9) та малинерційної хромель-капелевої термометри. Крім того використовувалися технічні ртутні термометри.

Сушіння досліджуваного зерна в щільному нерухомому шарі проводили в касеті (6). Нагрівання повітря та його підведення в касету здійснювали за допомогою електрокалорифера (4) і вентилятора (1). Охолодження досліджуваного зерна в щільному нерухомому шарі здійснювали в касеті (8). Регулювання та контроль швидкості агента сушки й повітря в касетах (6) і (8) виконували за допомогою регулятора напруги (2) (змінюючи частоту обертів вентилятора) і ротаметра (3).

Регулювання температури агента сушки здійснювали за допомогою струмкового реле (5) і контактного термометра, встановленого під касетою (6).

Під час відтворення умов реверсивного підведення агента сушки (і повітря) до шарів зерна, що висушуються (або охолоджуються), використовували дві аналогічні касети. Пошарові зміни температури зерна в касетах (6) і (8) фіксували при вимкненому вентиляторі (1) технічними ртутними термометрами, постійно вмонтованими в зазначені касети.

4.Формування серій експериментів. Було визначено декілька режимів роботи сепаратора, які відрізнялися:

- швидкістю та напрямом повітряного потоку;
- товщиною шару зерна;
- типом сит (металеві / пластикові);
- тривалістю впливу повітряного потоку на зерновий матеріал.

5.Вимірювання показників зерна та повітряного середовища. Під час досліджень реєстрували температуру, відносну вологість, швидкість повітря, втрати маси зерна, кількість пошкоджених зернин та ступінь механічного травмування після контакту із ситами.

6.Статистична обробка отриманих результатів. Дані дослідів були опрацьовані з використанням методів варіаційної статистики з визначенням середніх величин, похибок, довірчих інтервалів та регресійних залежностей.

2.2. Методика дослідження процесу очищення на повітряно–ситних сепараторах стаціонарних технологічних ліній

Методика базується на принципах руху повітряного потоку через зерновий шар та взаємодії частинок різної щільності й крупності з повітряним середовищем. Для відтворення умов роботи промислових сепараторів використовували лабораторну установку, схема якої включає вентилятори, калорифери, систему повітропроводів, касети з ситами, манометричне та психрометричне обладнання.

Установка складалася з таких основних елементів:

- вентилятор для створення і регулювання повітряного потоку;
 - регулятор напруги для зміни частоти обертів вентилятора;
 - ротаметр для вимірювання витрати повітря;
 - діафрагма та U-подібний манометр для визначення перепаду тиску та стабілізації повітряного потоку;
 - теплоізовані касети з сітчастими перегородками (імітація сит);
 - термопари та психрометр для контролю температури та вологості повітря.
- Усі елементи попередньо перевірялися на герметичність та точність показів.

Проведення дослідження

1. Розміщення зерна. Наважку зерна рівномірно розподіляли по площині касет із сітчастими перегородками. Товщина шару змінювалася залежно від серії експерименту (20, 40 і 60 мм).

2. Регулювання повітряного потоку. Швидкість повітря встановлювали за допомогою вентилятора та ротаметра в межах 0,3–1,2 м/с, що відповідає режимам роботи промислових сепараторів.

3. Вимірювання параметрів середовища.

- температура повітря — термометрами та термопарами;
- відносна вологість — психрометром;
- перепад тиску — манометром;
- рівномірність потоку — за коливаннями показів манометра.

4. Оцінка ефективності очищення. Після проходження повітряного потоку зернову масу піддавали контрольному просіюванню та визначали:

- частку легких домішок, видалених повітряним потоком;
- ступінь розшарування суміші;
- кількість недовидалених домішок.

5. Реєстрація результатів. Кожен експеримент повторювали не менше трьох разів. Результати заносили до журналу спостережень із фіксацією усіх параметрів.

2.3. Методика лабораторних досліджень

Відповідно до програми наукового дослідження були виготовлені: лабораторна установка з сушильною камерою касетного типу для вивчення процесу висушування щільного шару матеріалу, як нерухомого, так і агента висушування, що рухається в протитоці, і дослідний зразок протитокової сушарки СЗПК-4.

Лабораторна установка (рисунок 2.1, 2.2) [105] складається з сушильної камери касетного типу, набраної із змінних касет, відцентрового вентилятора з асинхронним електродвигуном, оснащеного частотним регулятором, блока електронагрівачів та щита управління.

Змінні касети мають можливість вилучення із сушильної камери та їх заміни. Крім того, касети взаємозамінні, для правильної установки в сушильну камеру вони пронумеровані. Кожна касета складається з дерев'яної теплоізолюючої стінки та сітчастого днища. Щоб уникнути зволоження теплоізолюючих стінок касет, вони покриті лаком, і крім того, з внутрішньої сторони обклеєні алюмінієвою фольгою. Для запобігання проривам агента висушування в місцях з'єднання касет є еластичний ущільнювач.

Лабораторна установка оснащена крильчатим анемометром, обладнаним перехідником, та датчиком температури агента висушування, з'єднаним з вимірювачем–регулятором температури.

Відповідно до наведеної вище конструктивно–технологічної схеми був розроблений зразок протитокової сушарки СЗПК-4 (рисунок 2.3) з нерухомою сушильною камерою, оснащений системою завантаження–вивантаження зерна, що

складається з бункера–живильника та вивантажувального пристрою шнекового типу. Дослідний зразок змонтовано на базі хлібоприймального пункту в м. Заводське.

Методика та техніка лабораторного дослідження впливу швидкості фільтрації агента висушування та вихідної вологості пшениці на швидкісні параметри висушування

Завданням лабораторного дослідження було отримання даних про швидкість зміни вологості матеріалу по висоті його шару та швидкості руху зони висушування в щільному шарі матеріалу при його обробці в протитоці агента висушування, для того, щоб надалі визначити мінімальну висоту зернового шару в сушильній камері, висоту шару зерна, що вивантажується з сушильної камери, а також період завантаження–розвантаження сушильної камери.

Для проведення лабораторних досліджень використовувалося зерно пшениці, штучно зволожено згідно з методикою, викладеною в розділі 2.2.2.

Як основні фактори, що впливають на процес висушування матеріалу в щільному шарі, були обрані вихідна вологість матеріалу та швидкість фільтрації агента висушування.

Експеримент проводили в такий спосіб. Сушильна камера касетного типу лабораторної установки завантажувалася матеріалом, зволеним до рівня вологості, яку визначали за стандартом [10]. За нижній рівень варіювання вологості було прийнято її значення 180/0, оскільки при вологості менше цього значення доцільніше застосовувати сушку активним вентиляванням. Верхній рівень варіювання вологості становив 26%, зерно з більшою вологістю рекомендується попередньо обробляти з метою зниження вологості на аерозелобах або вентиляваних бункерах. Після цього включали вентилятор, що подає агент висушування, нагрітий електрокалорифером до температури 45 ± 2 °С, що відповідало початку процесу висушування. Задане значення температури підтримувалося розміщеним на щиті керування двопозиційним вимірником–регулятором температури ТРМ. Варіювання швидкості фільтрації агента

висушування здійснювалося зміною частоти обертання електродвигуна вентилятора за допомогою частотного перетворювача. Діапазон варіювання швидкості фільтрації агента висушування становив 0;2...0,6 м/с, оскільки значення даного діапазону характерні для сучасних сушарок щільного шару. Вимірювання швидкості фільтрації агента висушування здійснювалося анемометром, обладнаним перехідником.

Через рівні проміжки часу, що становлять 15 хвилин, в роботі установки робилися п'ятихвилинні перерви, протягом яких касети з матеріалом витягувалися з сушильної камери для проведення вимірювань температури матеріалу, що знаходиться в касетах, пірометром та вимірювання ваги касет на електронних лабораторних вагах з метою визначення вологості матеріалу, що знаходиться в них. Час перерв вибрано виходячи з його достатнього для проведення вимірювань значення. Час висушування матеріалу, що становить 15 хвилин, вибрано на основі компромісного рішення між зниженням впливу на процес висушування п'ятихвилинних пауз і кількістю вимірювань для побудови кривих висушування. Вологість матеріалу в процесі висушування розраховувалася за такою формулою:

$$\omega = \frac{m - (m_1 - \omega_d(m_1 - m_{\text{ПК}}))}{m - m_{\text{ПК}}}$$

де m – поточне значення маси касети з матеріалом, кг;

$m_{\text{ПК}}$ – маса порожньої касети, кг;

m_1 – маса касети із зволоженим матеріалом, виміряна до висушування, кг;

ω_d – вихідна вологість матеріалу, %.

При досягненні вологості матеріалу в нижній касеті (найближчої до введення агента висушування) кондиційного значення касета вилучалася з сушильної камери і замінювалася касетою з вологим матеріалом, що встановлюється в її верхній частині, забезпечуючи тим самим протитоковий режим висушування.

У процесі висушування також вимірювалося значення температури та вологості зовнішнього повітря вимірювачем температури–вологості ІТБ, і атмосферний тиск – барометром. Отримані дані заносилися до журналу.

Відповідно до отриманих для кожного досвіду даних, будувалися графіки залежності вологості матеріалу за шарами (касетами) від часу висушування. За цими графіками, беручи до уваги лінійну модель зміни вологості було визначено значення швидкості зміни вологості по висоті шару та швидкості руху зони висушування для всіх вибраних рівнів варіювання факторів. Для визначення швидкісних параметрів висушування був застосований метод посічених, що полягає в наступному. Через дві сусідні криві висушування були проведені вертикальні площини, що перетинають їх у точці з вологістю 14% (кондиційна вологість для пшениці). Відстань між цими січними відповідно до обраного масштабу відповідає періоду заміни касет. По довжині відрізка січної між кривими висушування визначали різницю середніх вологостей двох сусідніх касет (рисунок 2.4).

При цьому швидкість руху зони висушування, у зерновому шарі мм/хв, визначалася за формулою:

$$v_d = \frac{h_{\text{КАС}}}{T} \quad (2.2)$$

де $h_{\text{КАС}}$ – висота шару матеріалу, що знаходиться в касеті, мм;

T – період заміни касет, хв.

Швидкість зміни вологості за висотою шару, %/мм, розраховувалася за формулою:

$$v_{\omega} = \frac{\Delta\omega}{h_{\text{КАС}}} \quad (2.3)$$

де $\Delta\omega$ – різниця середніх вологостей сусідніх касет.

Отримані таким чином дані піддані регресійному аналізу, в результаті якого були отримані емпіричні залежності швидкості руху зони висушування та швидкості зміни вологості матеріалу по висоті сушильної камери.

Методика штучного зволоження зерна

Методика штучного зволоження зерна (регулювання його вихідної вологості) полягала в наступному:

1. Укладання зерна на поліетиленову плівку тонким рівномірним шаром та рівномірно наносили на нього воду за допомогою пульверизатора. Масу води для зволоження розраховували за такою формулою:

$$m_B = \frac{1,2 \cdot m_3 \cdot (\omega_3 - \omega_B)}{100 - \omega_3},$$

де 1,2 – коефіцієнт, що враховує втрати вологи при розпиленні та сорбційний гістерезис;

m_3 – маса зволожуваного зерна, кг;

ω_3 та ω_B – вологість зволоженого та вихідного зерна відповідно, %.

2. Після зволоження ретельне перемішування зерна та розподілення рівним шаром. Після перемішування зерно щільно вкривали поліетиленовою плівкою. Витримували зерно протягом чотирьох діб, при цьому проводили перемішування протягом першої години після зволоження – кожні 15 хвилин, далі через 3–5 годин.

3. Після витримки відбирали проби на вологість із п'яти ділянок відповідно до стандарту [10].

4. Після визначення вологості у разі недостатнього зволоження на зернову купу з пульверизатора наносили воду при ретельному перемішуванні. Необхідну кількість води розраховували за формулою (2.4). У разі зайвого зволоження її підсушували потоком теплого повітря, створюваного калорифером. У цьому випадку зерно після обробки піддавали відлежуванню протягом двох діб.

Методика дослідження впливу технологічних факторів на енергетичні показники системи завантаження–вивантаження та оптимізації режиму її роботи

Завдання оптимізації роботи системи завантаження та вивантаження полягало у виборі режиму її роботи, при якому витрати енергії на транспортування матеріалу в процесі висушування будуть мінімальними за збереження його посівних якостей. Для визначення енерговитрат визначали потужності, на привід системи завантаження та вивантаження за різних режимів її руху. До завдань експерименту входило виявлення наступних залежностей:

1. середньої потужності, що споживається електродвигунами вивантажувального шнека та механізму переміщення системи завантаження–вивантаження, від кутових швидкостей обертання вивантажувального шнека та системи завантаження–вивантаження

$$P_{\text{ср.с}} = f(\omega_{\text{с}}; \omega_{\text{шн}}); P_{\text{ср.шн}} = f(\omega_{\text{с}}; \omega_{\text{шн}});$$

2. енергії, витраченої однією оборот системи завантаження і вивантаження, від кутових швидкостей обертання вивантажувального шнека і системи завантаження–вивантаження $W = f(\omega_{\text{с}}; \omega_{\text{шн}})$.

При вивченні та аналізі різних методів вимірювання потужності [10] для машини, що розглядається, був обраний метод амперметрвольтметра з використанням електроприводу постійного струму з незалежним збудженням. Суть методу полягає у вимірі сили струму в ланцюгу якоря і напруги, що підводиться до нього, за допомогою амперметра і вольтметра і розрахунку потужності за отриманими значеннями.

Механічна потужність на валу електродвигуна, Вт (включаючи її втрати на тертя у підшипниках та щітково–колекторному вузлі) визначалася за такою формулою.

$$P_M = U_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}} - I_{\text{я}}^2 \cdot R_{\text{я}},$$

де $U_{я}$ – напруга, що підводиться до якоря електродвигуна, В;

$I_{я}$ – сила струму, в обмотці якоря електродвигуна, А;

$R_{я}$ – Опір ланцюга якоря електродвигуна, Ом.

Недоліком описаного методу є необхідність визначення та реєстрації показань приладів вручну.

При теоретичній оцінці факторів, що впливають на потужність та енергію, що витрачається на привід системи завантаження–вивантаження дослідного зразка сушарки в процесі одночасного завантаження та вивантаження сушильної камери було виділено два найбільш значущі фактори, а саме: кутова швидкість обертання системи завантаження та вивантаження ($\omega_{ос}$) та кутова швидкість обертання її вивантажувального шнека ($\omega_{шпг}$).

Очевидно, що вага, що діє на точки опори системи завантаження–вивантаження, змінюється при зміні її положення внаслідок зміни маси зерна в бункері–живильнику. У зв'язку з цим, потужність приводу системи завантаження–вивантаження в різних положеннях щодо сушильної камери може бути різною.

Перед початком експерименту виходячи з пошукових дослідів і теоретичних положень було встановлено межі варіювання обраних чинників. Варіювання кутової швидкості обертання системи завантаження та вивантаження, а також її вивантажувального шнека здійснювалася автотрансформаторами (рисунок 2.4), включеними до ланцюга якорів їх електродвигунів.

Схеми підключення обох двигунів ідентичні.

Кутова швидкість обертання системи завантаження–вивантаження вимірювалася за допомогою секундоміра. При цьому проводилося вимірювання часу $\frac{1}{2}$ обороту системи завантаження та вивантаження (час її проходження від контрольної точки 2 до контрольної точки 4). Для визначення значення кутової швидкості число транспортних засобів ділили на вимірне значення часу. Швидкість обертання вивантажувального шнека вимірювалася тахометром.

Середня потужність механізму переміщення системи завантаження та вивантаження, Вт, обчислювалася за формулою:

$$P_{\text{ср.с}} = \frac{\frac{P_1 + P_n}{2} + \sum_{i=2}^{n-1} P_i}{n},$$

де n – кількість контрольних точок.

Середня потужність вивантажувального шнека системи завантаження–розвантаження, Вт, обчислювалася за формулою:

$$P_{\text{ср.шн}} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}.$$

Енергія, витрачена на переміщення системи завантаження–вивантаження за її оборот, Дж, розраховували за формулою:

$$W = \frac{2 \cdot \pi \cdot (P_{\text{с}} + P_{\text{шн}})}{\omega_{\text{с}}}.$$

Методика та техніка відомчих натурних випробувань дослідного зразка протитокової сушарки СЗПК–4

Випробування дослідного зразка проводилися на протитоковій сушарці в умовах виробництва хлібоприймального пункту міста Заводське при повністю завантаженій сушильній камері у насінневому режимі роботи сушарки.

Вологість і температуру надходить на висушування матеріалу визначали при завантаженні матеріалу в сушильну камеру відповідно до стандарту. Відбір проб проводився з верхнього шару матеріалу, відповідно до схеми. Таким чином, зважаючи на те, що час одного повного обороту системи завантаження–вивантаження матеріалу в сушильній камері становив 36 хв., за кожен оборот проводили 4 відбори

проб зерна з періодичністю 9 хвилин. Проби матеріалу безпосередньо після відбору поміщали дерев'яні теплоізолюючі ящики для вимірювання температури зерна ртутними термометрами. З відібраної проби після вимірювання температури виділялася проба масою 50 г. і поміщалася в поліетиленовий герметично закритий пакет для визначення вологості відповідно до стандарту із застосуванням сушильного шафи та аналітичних ваг. Решта проби масою 1 кг поміщалася в полотняний мішок, з якого була виділена середня проба для аналізу насіння на схожість, енергію проростання, чистоту і травмування відповідно до стандарту. Повний аналіз середніх проб відібраних на вході та на виході з сушильної камери було проведено фахівцями лабораторії підприємства.

Вологість і температура матеріалу на вході в сушильну камеру визначалася протягом 3 циклів завантаження–вивантаження, тим самим була забезпечена триразова повторність проведення вимірювань та рух верхнього шару, завантаженого в сушильну камеру при проведенні першого циклу завантаження–вивантаження матеріалу. Беручи до уваги, що конструкція сушарки передбачає одночасне знаходження в сушильній камері чотирьох шарів матеріалу (висота шару матеріалу, що знаходиться в сушильній камері, дорівнює 520 мм, висота вивантажуваного, шару 130мм) був зроблений висновок про те, що при четвертому циклі завантаження–вивантаження матеріал, завантажений у неї за першого циклі, буде вивантажуватись. Тому, починаючи з четвертого циклу, проводився відбір проб на виході із сушильної камери (проби висушеного матеріалу відбиралися після шнека вивантажувального пристрою системи завантаження–вивантаження) [99с.70].

Схема розташування контрольних точок відбору проб наведено малюнку 2.8. З пробами, відібраними на виході з сушильної камери, проводилися вимірювання та аналіз, аналогічні проб на вході в сушильну камеру. Після закінчення шостого циклу завантаження–вивантаження випробування сушарки закінчували. Контроль витрати агента висушування, що нагнітається в сушильну камеру вентилятором від

теплогенератора по повітропроводу, здійснювали протягом всього випробування за показаннями мікроманометра, що працює в режимі вимірювання динамічного тиску, з періодичністю 9хв.

Для вимірювання динамічного та повного тиску агента висушування у повітроводі відповідно до рекомендацій [99, 32] для його ділянки круглого перерізу була виготовлена система вимірювальних трубок, схема якої представлена на малюнку 2.9. При цьому витрата агента висушування, м/год, розраховувалася за показаннями мікроманометра за формулою:

$$Q_1 = 3600 \cdot F \cdot K_{тр} \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot K \cdot H_{дсп} (273 + t_1)}{343}}, \quad (3.11)$$

де F – площа поперечного перерізу повітроводу, м,

$K_{тр}$ – коефіцієнт інструменту трубки;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

K – коефіцієнт мікроманометра, що враховує щільність спирту і нахил трубки;

$H_{дсп}$ – середній динамічний тиск, Па;

t_1 – температура агента висушування, °С.

З тією ж періодичністю – 9 хвилин реєструвалися показання температури агента висушування, що нагнітається в сушильну камеру вимірювачем–регулятором температури ТРМ з датчиком ТСМ. Температура та вологість зовнішнього повітря вимірювалися вимірювачем температури–вологості ІТВ. Атмосферний тиск було виміряно барометром.

Істотною відмінністю розробленого дослідного зразка сушарки СЗГК–4 від протитокових сушарок, що серійно випускаються, є нерухома сушильна камера. У зв'язку з цим характер розподілу потоку агента висушування площею сушильної камери та його нерівномірність можуть мати істотні відмінності. Оцінка

нерівномірності розподілу потоку агента висушування в сушильній камері проводилася вимірюванням швидкості агента висушування в різних точках камери сушильної анемометром, обладнаним перехідником. Оскільки рекомендації щодо розташування контрольних точок у сушильній камері для камери циліндричного типу в літературі не наводяться [99]. Було запропоновано хрестоподібну схему розташування контрольних точок (рисунок 2.10), за аналогією з вимірюванням повітряного потоку в повітропроводах круглого перерізу. Для визначення швидкості фільтрації агента висушування в кожній точці виконували перерахунок значення швидкості, виміряної анемометром, з урахуванням геометричних параметрів перехідника за формулою:

$$g_{\text{ФИЛЬТР}} = g_{\text{ИЗМ}} \cdot \frac{D_A^2}{D_{\text{ПЕР}}^2}, \quad (3.12)$$

де $D_{\text{ПЕР}}$ – діаметр вхідної горловини перехідника, м;

D_A – діаметр вихідної горловини перехідника, м.

Визначення продуктивності сушарки у фізичних тоннах за сухим матеріалом проводили методом відсікань [99]. Протягом кожного з трьох останніх циклів завантаження–вивантаження проводилися 4 п'ятисекундні відсічення матеріалу, що вивантажується із сушильної камери. Продуктивність сушарки з урахуванням періодичності роботи системи завантаження та вивантаження у фізичних тоннах за масою отриманих відсічок розраховувалася за формулою:

$$G = \frac{3,6 \cdot m_{\text{відс}} \cdot T_p}{T_{\text{відс}} \cdot T_{\text{Ц}}}, \quad (3.13)$$

де $m_{\text{відс}}$ – маса відсічки, кг

$T_{\text{відс}}$ – час відсічення, с;

T_p – час роботи системи завантаження та вивантаження протягом 1 циклу, с;

$T_{\text{Ц}}$ – час циклу завантаження та вивантаження сушильної камери, с.

Витрата електроенергії визначали по різниці показань індукційного лічильника активної енергії на початку та наприкінці випробувань. Годинний витрата електроенергії визначався за аналогією з витратою палива, розподілом значення, вимірюного лічильником, на час проведення випробувань.

2.4 Вимірювальні прилади та обладнання.

При проведенні досліджень та випробувань відповідно до застосовуваних методик використовувалися наступні вимірювальні прилади.

Визначення вологості зерна проводили відповідно до стандарту із застосуванням сушильного шафи, аналітичних ваг ВЛКТ160 та лабораторного млина (рисунок 2.6).

Температуру зерна вимірювали ртутними термометрами, поміщаючи проби матеріалу теплоізолюючі дерев'яні ящики, а також пірометром

Швидкість фільтрації агента висушування визначали цифровим анемометром АП-1, обладнаним перехідником, а також значення динамічного тиску, вимірюного мікроманометром ММН-240. Для вимірювання температури та вологості атмосферного повітря був використаний вимірювач температури-вологості ІТВ 2605. Для вимірювання температури агента висушування застосовувався вимірювач-регулятор температури ТРМ1 з датчиком типу ТСМ. Атмосферний тиск вимірювали барометром БАММ-1.

Зміну частоти обертання валу вивантажувального шнека проводили механічним тахометром. Облік спожитої електроенергії під час проведення випробувань сушарки проводили індукційним лічильником активної енергії Т-2С43. Для вимірювання часу застосовувався секундомір Samsung E-200. Для вимірювання енергетичних показників електроприводів застосовувався аналого-цифровий перетворювач ЛА-2 USB.

Для вимірювання та реєстрації енергетичних показників приводів системи завантаження та вивантаження зерна були застосовані електродвигуни постійного

струму, у комплекті з трансформаторами гальванічної розв'язки та пультом керування, оснащеним вимірювальними перетворювачами. Вимірні показники записувалися в ЕОМ у вигляді аналого–цифрового перетворювача.

Використані вимірювальні пристрої забезпечили заявлену точність вимірювань.

Висновки до розділу 2

У другому розділі розроблено та обґрунтовано методику експериментальних і натурних досліджень процесів очищення та сушіння зерна в стаціонарних технологічних лініях із використанням повітряно-ситних сепараторів і сушарок щільного шару.

Сформовано детальний план експериментальних досліджень, який передбачає відтворення реальних умов роботи зерноочисного та сушильного обладнання, забезпечення подібності технологічних процесів і систематичну зміну основних конструктивно-технологічних параметрів.

Розроблено та використано лабораторну експериментальну установку, що дозволяє досліджувати процеси очищення зерна повітряним потоком, сушіння та охолодження зернового матеріалу як у щільному нерухомому шарі, так і в умовах протитечії агента сушіння. Конструкція установки забезпечує контроль швидкості, температури та вологості повітря, а також товщини шару зерна.

Запропонована методика дослідження процесу очищення на повітряно-ситних сепараторах базується на аналізі взаємодії зернового шару з повітряним потоком різної інтенсивності та дозволяє оцінити ефективність видалення легких домішок за різних режимів роботи.

Розроблено методику лабораторних досліджень процесу сушіння зерна в щільному шарі, яка враховує вплив швидкості фільтрації агента сушіння та вихідної

вологості зерна на швидкісні параметри висушування і переміщення зони сушіння по висоті шару.

Застосування методу посічених та регресійного аналізу дало змогу визначити емпіричні залежності між основними технологічними факторами і швидкісними параметрами процесу сушіння, що створює основу для подальшої оптимізації режимів роботи сушарки.

Розроблено та обґрунтовано методику штучного зволоження зерна, яка забезпечує стабільність і відтворюваність початкових умов експериментів та відповідає вимогам чинних стандартів.

Запропоновано методику визначення енергетичних показників системи завантаження–вивантаження сушарки, що дозволяє оцінити вплив режимів її роботи на споживану потужність та енерговитрати в процесі сушіння зерна.

Натурні відомчі випробування дослідного зразка протитокової сушарки в умовах виробництва підтвердили придатність розробленої методики для оцінювання технологічних, енергетичних та якісних показників процесу сушіння зерна.

Отримані в розділі методичні положення та експериментальні підходи є надійною основою для подальшого аналізу результатів досліджень, обґрунтування оптимальних режимів роботи зерносушильного обладнання та оцінки ефективності запропонованих конструктивно-технологічних рішень.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

3.1. Вибір базової моделі аспіраційної системи елеватора

Для експериментального дослідження було обрано комбіновану систему очищення та сушіння зерна, яка включає:

- очисний комплекс (зерноочисні машини, аспіраційні камери),
- повітряно–ситові та сепараційні машини,
- шахтну сушарку періодичної пії,
- систему аспірації підсиленого типу,
- циклонну або фільтрувальну установку,
- шлюзові затвори, що забезпечують стабільну та контрольовану подачу зерна.

Для експериментальних досліджень було прийнято комбіновану технологічну систему елеватора, що включає очисний комплекс, систему аспірації та шахтну зерносушарку продуктивністю 50 т/год. У якості базової моделі обрано діючу аспіраційну систему, яка забезпечує видалення пилу та легких домішок із зон попереднього очищення, проміжного транспортування та сушіння зерна.

Базова аспіраційна система містить: аспіраційні камери, мережу повітроводів зі змінним перерізом, циклонні пиловловлювачі, вентилятори, а також живильники і шлюзові затвори, що забезпечують дозовану подачу зерна. За результатами попереднього обстеження встановлено, що існуюча конструкція має низку недоліків: підвищені втрати тиску, нестабільність швидкості повітря в окремих ділянках, нерівномірність подачі зерна через шлюзові затвори та недостатньо високу ефективність видалення пилу із запиленого повітря. Це зумовило необхідність модернізації окремих вузлів аспіраційної мережі.

Базову модель було обрано за критеріями:

- продуктивність 50 т/год ,
- наявність комбінованої аспірації ,
- можливість моделювання реальних процесів пиловиділення ,
- наявність ділянок, де можливі втрати швидкості та тиску.

Основні елементи базової моделі:

- прямоточні та рециркуляційні канали сушарки,
- аспіраційні коробки з фіксованим перерізом,
- вертикальні та горизонтальні повітроводи,
- циклонний апарат,
- шнекові та шлюзові живильники.

Система містила вузли підвищеного опору, що і стало об'єктом подальшої модернізації.

Аеродинамічні дослідження пневмосепаруючого каналу проводилися за постійних конструктивно-технологічних параметрів пневмосистеми: $A = 0,20$ м; $\alpha = 75^\circ$; $h_s = 0,10$ м; $h_l = 0,26$ м; $n = 120$ хв⁻¹.

Відповідно до рисунку 3.3, а, під час роботи «вхолосту» поле швидкостей у перерізі 1–1, який розташований у місці подачі зернового матеріалу, є відносно рівномірним. Коефіцієнт варіації та середня швидкість повітряного потоку становлять відповідно: $v_v = 11,13$ % та $\bar{v} = 10,91$ м/с.

Вищі передні швидкості спостерігаються у центральній зоні по глибині каналу, нижчі – біля зовнішньої стінки.

За робочого режиму з удільною подачею зернового матеріалу $q = 8,6$ кг/(с·м) (Рисунок 3.1, б) поле швидкостей стає більш нерівномірним. Коефіцієнт варіації зростає до $v_v = 24,61$ %, а середня швидкість повітряного потоку знижується до $\bar{v} = 9,74$ м/с.

Найбільш значне зниження швидкості фіксується біля зовнішньої стінки пневмосепарувального каналу. Це пояснюється тим, що на початку руху шар зернового матеріалу є більш щільним і чинить повітрю більший опір, унаслідок чого повітряний потік від зовнішньої стінки зміщується в центральну частину каналу.

Зменшення середньої швидкості повітряного потоку становить 11 % і відбувається через зміщення робочої точки на характеристиці вентилятора в бік зменшення його продуктивності.

Якість повітряного потоку, попри певне погіршення порівняно з холостим ходом, можна вважати цілком задовільною, оскільки нерівномірність проявляється переважно за глибиною каналу, тоді як за шириною потік залишається рівномірним.

Концепція удосконалення аспіраційної системи елеватора базувалася на результатах аналізу аеродинаміки повітряних потоків, структури пилоповітряної суміші та режимів роботи очисного й сушильного обладнання. Основною метою модернізації було:

- зниження гідравлічного опору повітроводів;
- стабілізація швидкості повітря в робочих зонах;
- підвищення рівномірності подачі зерна через живильники та шлюзові затвори;
- збільшення ефективності пиловідокремлення.

Передбачалося виконати комплекс таких заходів: оптимізація шляху повітроводів (усунення різких поворотів і звужень), удосконалення конструкції аспіраційних камер, модернізація циклонних апаратів та живильних вузлів. Очікуваними результатами модернізації є зменшення втрат тиску, підвищення стабільності режимів роботи вентиляторів, зменшення виносу повноцінного зерна з аспіраційним повітрям та покращення санітарно-гігієнічних умов у виробничих приміщеннях.

Після аналізу гідродинаміки потоків у базовій моделі (розділ 2) визначено такі ключові недоліки:

1. Втрати тиску у повітроводах досягали 180–200 Па.
2. Нестабільність швидкості повітря в окремих ділянках (коливання $\pm 0,6$ м/с).
3. Нерівномірність подачі зерна через шлюзові затвори (варіація коефіцієнта подачі 0,75–0,85).
3. Передчасне осідання пилу в каналах, що знижує ефективність очищення.

Концепція модернізації включала:

- переформування вузлів забору повітря для зменшення турбулентності,
- встановлення нових шлюзових затворів зі змінним кутом лопатей,
- оптимізацію повітроводів шляхом вирівнювання перерізу та усунення різких вигинів,
- підвищення аеродинамічної рівномірності за рахунок перерозподілу об'ємів.

Ціль модернізації – зменшити втрати тиску та стабілізувати швидкість, щоб покращити ефективність пиловловлення та подачі зерна.

3.3. Модернізація окремих вузлів

Експериментальними дослідженнями встановлено, що в базовому варіанті аспіраційних камер спостерігається нерівномірний розподіл швидкості повітря по висоті й ширині перерізу, а також локальні зони зниженої швидкості, де відбувається накопичення пилу. Для усунення цих недоліків було змінено конфігурацію вхідних та вихідних патрубків, збільшено площу перфорованих розподільних решіток та встановлено вирівнювальні екрани. Це дало змогу сформувати більш однорідне поле швидкостей у робочій зоні камери та підвищити ефективність відокремлення легких домішок.

Проблеми, виявлені у базовій конструкції:

- неоднорідність потоку у верхній зоні камери,
- нерівномірне зняття легких фракцій,
- надмірне винесення фракцій при локальному зростанні швидкості.

Для удосконалення встановлено додаткові вирівнювальні щитки, змінено відстань між підвідними та відвідними каналами, збільшено площу перфорованих перегородок, змінено форму зони виходу повітря. Проведено дослідження, що підтверджують – рівномірний розподіл повітря по всій висоті камери (Рисунок 3.4).

Дослідження розподілу компонентів зернового матеріалу за глибиною та висотою розподільної камери (Рисунок 3.4) проводили на експериментальній установці (Рисунок 3.2) без відбивної площини, за постійних конструктивно-технологічних параметрів пневмосистеми: $b = 0,25$ м; $H_c = 0,50$ м; $n_v = 115$ хв⁻¹; $\gamma = 80^\circ$; $q = 8,6$ кг/(с·м). Режим роботи пневмосистеми було обрано таким, за якого втрати повноцінного зерна з відходами становили $\eta_3 = 0,05$ %. Схема встановлення пробовідбірника у розподільну камеру наведено на рисунку 3.7.

Згідно з рисунком 3.4, а, у даному перерізі легкі домішки розподілені між чотирма секціями пробовідбірника:

- у другій – $\omega_{12} = 1,5$ %;
- у третій – $\omega_{13} = 6,6$ %;

– у четвертій – $\omega_{14} = 29,8 \%$;

– у п'ятій – $\omega_{15} = 62,1 \%$.

Зернова фракція розподілена між трьома секціями:

– у третій – $\omega_{33} = 3,5 \%$;

– у четвертій – $\omega_{34} = 23,6 \%$;

– у п'ятій – $\omega_{35} = 72,9 \%$.

Шоста секція пробовідбірника у роботі не бере участі, оскільки перекривається спільною суміжною стінкою пневмосепаруючого каналу (ПСК) та розподільної камери.

Із підвищенням висоти встановлення пробовідбірника у розподільній камері розподіл зернового матеріалу за глибиною суттєво змінюється. Так, у п'ятому перерізі (Рисунок 3.7, д) легкі домішки розподілені між двома секціями:

– у п'ятій – $\omega_{15} = 5,5 \%$; – у шостій – $\omega_{16} = 94,5 \%$.

У цьому перерізі зерно до пробовідбірника не потрапляє.

Результати проведених досліджень показують, що з умови непотрапляння зерна у пиловідвідний канал при встановленні відбивної площини та транспортуванні через нього більшої частини легких домішок, передню кромку відбивної площини рекомендується встановлювати на висоті $Y_n = 0,47 \dots 0,55$ м і на відстані від зовнішньої стінки ПСК $h_n = 0,25 \dots 0,30$ м.

На якість роботи роздільної камери впливає низка факторів:

- форма та конструктивні параметри відбивної площини;
- висота H_c спільної стінки між роздільною та осадочною камерами;
- швидкість V_n повітряного потоку в пневмосепаруючому каналі;
- висота H_n верхньої частини камери.

На першому етапі досліджень за допомогою однофакторних експериментів було вивчено вплив різних форм і конструктивних параметрів відбивних площин на якісні показники роботи пневмосистеми.

Дані дослідження проводили при сталих конструктивно-технологічних параметрах пневмосистеми: ($h_0 = 0,25$ м; $\alpha = 80^\circ$; $H_v = 0,05$ м; $H_s = 0,50$ м; $n_v = 115$ хв⁻¹; $Y_p = 0,50$ м; $h_0 = 0,25$ м; $q = 8,6$ кг/(с·м); $P_3 = 0,05 \%$).

Залежність показників роботи пневмосистеми від кута β нахилу прямолінійної відбивної площини довжиною $l_{оп}=0,25$ м подано на рисунку 3.5.

Кут β вважали додатним у разі повороту відбивної площини проти годинникової стрілки від горизонталі та від'ємним – у протилежному випадку.

З графіків видно, що зміна кута β нахилу відбивної площини від -15° до $+45^\circ$ призводить до збільшення загального ефекту $E_{6\phi\beta}$ виділення легких домішок на 44,1 % (від 45,7 до 89,8 %). При цьому зменшується ефект E_{M1} видалення дрібного зерна в ПСК на 5,5 % (від 5,7 до 0,2 %), відносна маса a_2 фуражної фракції зерна на 5,8 % (від 6,1 до 0,3 %), і ефект E_1 очищення важкої фракції зерна від легких домішок – на 5,4 % (від 98,8 до 93,4 %).

Різке зростання $E_{6\phi\beta}$ спостерігається при зміні кута β від -15° до $+15^\circ$. Подальше збільшення кута β від $+15^\circ$ до $+45^\circ$ не чинить значного впливу на $E_{6\phi\beta}$.

Підвищення $E_{6\phi\beta}$ пояснюється тим, що при повороті відбивної площини проти годинникової стрілки кут відбиття частинок легких домішок від неї зменшується, і більша її частина надходить в осаджувальну камеру.

Зниження E_{M1} і E_1 пояснюється тим, що зі збільшенням кута β зростають втрати Π_3 повноцінного зерна у відході за тієї ж швидкості. Тому швидкість повітряного потоку при збільшенні β зменшували.

Таким чином, проведені однофакторні експерименти показали, що застосування в розподільній камері пневмосистеми прямолінійної відбивної площини при куті нахилу $\beta = 15\dots45^\circ$ не дає збільшення загального ефекту $E_{заг}$ виділення легких домішок порівняно з пневмосистемою без відбивної площини. Однак при встановленні відбивної площини під кутом $\beta = -15\dots+30^\circ$ у процесі роботи на неї потрапляють легкі домішки й зерно, що є недопустимим для реальної машини.

При куті нахилу відбивної площини $\beta = 45^\circ$ ефект виділення дрібного зерна становить всього $E_{M1} = 0,2$ %, що значно нижче необхідних значень. Отже, застосування прямолінійної відбивної площини в пневмосистемі є нерациональним. Потрібне встановлення відбивної плоскості іншої конструкції.

Падіння показників E_{m1} і E_1 пояснюється тим, що при збільшенні кута β зростають втрати P_3 повноцінного зерна у відходи при тій самій швидкості. Тому швидкість повітряного потоку при збільшенні β зменшували.

Однофакторні експерименти показали, що застосування у розподільчій камері пневмосистеми прямолінійної відбивної площини при кутах $\beta = 15 \dots 45^\circ$ забезпечує найбільший ефект $E_{\text{заг}}$ виділення легких домішок порівняно з роботою пневмосистеми без відбивної площини.

Однак при встановленні відбивної площини під кутом $\beta = -15 \dots +30^\circ$ у процесі роботи на ній починають затримуватися легкі домішки та зерно, що неприйнятно для реальної машини.

При $\beta = 45^\circ$ ефект виділення дрібного зерна становив лише $E_{m1} = 0,2 \%$, що значно нижче нормативних значень. Отже, застосування прямолінійної відбивної площини в пневмосистемі є нерациональним. Потрібно встановлювати таку відбивну площину, яка забезпечуватиме підвищення ефекту E_{m1} виділення дрібного зерна в ПСК при збереженні максимального значення $E_{\text{заг}}$ і недопущенні налипання частинок зернового матеріалу на площині.

З графіків видно, що збільшення кута нахилу γ від -12° до $+12^\circ$ призводить до зниження ефекту E_{m1} виділення дрібного зерна у ПСК на $6,0 \%$ (від $6,7$ до $0,7 \%$), відносної маси a_2 фуражної фракції зерна – на $5,7 \%$ (від $6,5$ до $0,8 \%$) і ефекту E_1 очищення важкої фракції зерна від легких домішок – на $2,5 \%$ (від $98,9$ до $96,4 \%$).

При цьому збільшується загальний ефект $E_{\text{заг}}$ виділення легких домішок на $41,2 \%$ (від $49,7$ до $90,9 \%$). Значний ріст $E_{\text{заг}}$ спостерігається при збільшенні кута γ від -12° до 0° . Подальше зростання γ не чинить суттєвого впливу на $E_{\text{заг}}$.

Проведено модернізацію циклона шляхом:

- збільшення довжини осаджувальної труби,
- встановлення кільцевого дефлектора,
- оптимізації кута входу пилового потоку.

Ефективність очищення зросла на $\approx 15 \%$, що підтверджується графіком “Ефективність видалення пилу”.

Повітроводи та вузли забору повітря

Проблеми:

- різкі повороти 90° , що створювали турбулентність,
- різновисотні переходи,
- різкий перехід діаметра,
- локальні ділянки зниженого тиску.

Модернізація:

- вирівнювання діаметра повітроводів,
- заміна кутових колін 90° на 45° ,
- стабілізація лінії повітряного тракту,
- встановлення компенсаційної ділянки для зменшення втрат тиску.

Після модернізації втрати тиску зменшилися з 180–200 Па – до 140–150 Па

Живильники та шлюзові затвори

Проблеми:

- сильна пульсація потоку,
- зависання фракцій на кромках лопатей,
- нерівномірний приріст масової витрати.

Рішення:

- встановлення нового шлюзового затвора зі змінним кутом атаки лопатей,
- зменшення зазору між ротором і корпусом,
- полімерне покриття внутрішньої поверхні (антиприлипання),
- встановлення вібраційного компенсатора.

Результат:

- нерівномірність подачі зменшилась з 10 % до 4 % ,
- коефіцієнт рівномірності зріс із 0,80 – 0,90 .

3.5. Розрахунок основних параметрів

Під час експериментальних досліджень було визначено основні експлуатаційні параметри аспіраційної системи до і після модернізації, зокрема:

- продуктивність за повітрям і зерном;
- втрати тиску в повітропроводах;
- швидкість руху повітря у контрольних перерізах;
- ефективність видалення пилу;
- рівномірність подачі через шлюзові затвори.

У базовому варіанті сумарні втрати тиску в мережі становили близько 180–200 Па, середня швидкість повітря в магістральних ділянках – 12–13 м/с з коливаннями $\pm 0,5$ м/с, ефективність пиловідокремлення – 72–75 %, фактична продуктивність системи – 45–47 т/год.

З метою глибшого вивчення процесів пневмосепарування зернового матеріалу, а також описання їх математичними моделями, було прийнято й реалізовано план експерименту Бокса-Бенкіна другого порядку для чотирьох факторів. Вибір плану другого порядку зумовлений складною взаємодією факторів між собою, а також нелінійним впливом цих факторів на показники робочого процесу пневмосистеми.

Таблиця 3.1 – Фактори, рівні та кроки їх варіювання

Кодоване позначення факторів	Назва факторів, їх позицiння та одиниця вимiрювання	Рiвнi факторiв	Крок варiювання
		-1	0
x_1	Висота H_v верхньої частини ПСК, м	0,05	0,15
x_2	Глибина h ПСК, м	0,20	0,23
x_3	Кут α нахилу ПСК, град	65	75
x_4	Частота n_v обертання підймального валика, xv^{-1}	100	120

Для дослідження були включені як фактори: висота H_v верхньої частини ПСК, глибина h ПСК, кут α нахилу ПСК та частота n_v обертання живильного валика. Як критерії оптимізації були обрані:

- загальний ефект $E_{\text{заг}}$ виділення легких домішок,
- ефект E_{m1} виділення дрібного зерна в ПСК,
- відносна маса a_2 фуражної фракції зерна.

Експериментальні дослідження проводилися за сталої висоти суміжної стінки $H_s = 0,50$ м, нижчої подачі зернового матеріалу живильним валиком, без відбивальної площини.

Втрати повноцінного зерна в відходи підтримували за допомогою регулятора витрати повітря на рівні $B_3 = 0,05$ %. Питома подача зернового матеріалу в ПСК становила $q = 8,6 \pm 0,1$ кг/(с·м).

Матриця плану експерименту та значення критеріїв оптимізації наведені в додатку А.

Після реалізації плану та обробки результатів експерименту отримано адекватні з імовірністю 95 % математичні моделі процесу пневмосепарування зернового матеріалу в ПСК (%):

$$E_{заг} = 65,49 + 0,02x_1 + 4,67x_2 - 19,39x_3 - 1,95x_4 + 1,83x_1^2 + 0,04x_1x_2 - 3,30x_1x_3 - 0,70x_1x_4 + 3,01x_2^2 + 2,91x_2x_3 + 0,03x_2x_4 - 1,42x_3^2 - 4,75x_3x_4 + 1,54x_4^2$$

$$E_{M1} = 5,52 - 8,66x_1 - 6,39x_2 + 3,45x_3 + 2,51x_4 + 4,99x_1^2 + 4,85x_1x_2 - 0,93x_1x_3 - 3,80x_1x_4 + 3,41x_2^2 - 6,90x_2x_3 - 0,51x_2x_4 + 1,56x_3^2 + 1,76x_3x_4 + 0,24x_4^2$$

$$a_2 = 3,12 - 5,52x_1 - 4,21x_2 + 2,26x_3 + 1,66x_4 + 3,24x_1^2 + 3,59x_1x_2 - 0,07x_1x_3 - 2,33x_1x_4 + 2,34x_2^2 - 4,52x_2x_3 - 0,23x_2x_4 + 1,09x_3^2 + 1,27x_3x_4$$

Фактори, рівні та кроки їх варіювання під час дослідження процесів пневмосепарування зернового матеріалу наведені в таблиці 3.2.

Після виключення з математичних моделей (3.1), (3.2) і (3.3) незначущих коефіцієнтів регресії та перерахунку решти коефіцієнтів, моделі набувають такого вигляду (%):

$$E_{заг} = 65,49 + 0,02x_1 + 4,67x_2 - 19,39x_3 - 1,95x_4 + 1,83x_1^2 + 0,04x_1x_2 - 3,30x_1x_3 - 0,70x_1x_4 + 3,01x_2^2 + 2,91x_2x_3 + 0,03x_2x_4 - 1,42x_3^2 - 4,75x_3x_4 + 1,54x_4^2$$

$$E_{M1} = 5,52 - 8,66x_1 - 6,39x_2 + 3,45x_3 + 2,51x_4 + 4,99x_1^2 + 4,85x_1x_2 - 9,31x_1x_3 - 3,80x_1x_4 + 3,33x_2^2 - 6,90x_2x_3 + 1,48x_2x_4 + 1,76x_3^2 - 1,31x_3x_4 + 0,24x_4^2$$

$$a_2 = 3,12 - 5,52x_1 - 4,21x_2 + 2,26x_3 + 1,66x_4 + 3,24x_1^2 + 3,59x_1x_2 - \\ - 0,07x_1x_3 - 2,33x_1x_4 + 2,34x_2^2 - 4,52x_2x_3 - 0,23x_2x_4 + 1,09x_3^2 + 1,27x_3x_4$$

Аналіз математичних моделей (3.16) та (3.17) проводили за допомогою двомірних перерізів поверхонь відгуку (Рисунок 3.13 і 3.14).

Максимальне значення загального ефекту виділення легких домішок $E_{\text{заг}} = 97,70\%$ досягається при:

- $x_1 = 1$ ($H_{\text{в}} = 0,25$ м);
- $x_2 = 1$ ($h = 0,26$ м);
- $x_3 = -0,99$ ($\alpha = 65^\circ$);
- $x_4 = 1$ ($n_{\text{в}} = 140$ хв⁻¹).

Найбільший вплив на загальний ефект $E_{\text{заг}}$ виділення легких домішок справляє кут α нахилу ПСК. Так, зменшення α з 85° до 65° (при $H_{\text{в}} = 0,25$ м; $h = 0,26$ м; $n_{\text{в}} = 140$ хв⁻¹) приводить до підвищення $E_{\text{заг}}$ на $49,12\%$ (від $48,58$ до $97,70\%$).

Отримані результати експерименту пояснюються тим, що при зменшенні кута α нахилу збільшується час польоту частинок у ПСК і відстань, яку проходять частинки від місця введення до внутрішньої стінки ПСК. Завдяки цьому зростає час дії повітряного потоку на частинки матеріалу, що створює кращі умови для виділення легких домішок.

Вплив висоти $H_{\text{в}}$ верхньої частини ПСК

Збільшення висоти $H_{\text{в}}$ верхньої частини ПСК від $0,05$ до $0,25$ м (при $h = 0,26$ м; $\alpha = 65^\circ$; $n_{\text{в}} = 140$ хв⁻¹) підвищує $E_{\text{заг}}$ на $6,80\%$ (від $90,90$ до $97,70\%$).

Це пояснюється тим, що зі збільшенням висоти $H_{\text{в}}$ збільшується траєкторія руху частинок легких домішок. Легкі частинки рухаються по більш крутих траєкторіях (біля верхньої стінки пневмосистеми), і значна їх частина потрапляє у осадову камеру.

Вплив глибини h ПСК

Збільшення глибини h ПСК від $0,20$ до $0,26$ м (при $H_{\text{в}} = 0,25$ м; $\alpha = 65^\circ$; $n_{\text{в}} = 140$ хв⁻¹) підвищує $E_{\text{заг}}$ на $3,77\%$ (від $93,93$ до $97,70\%$).

Це можна пояснити тим, що зі збільшенням глибини h у ПСК збільшується час впливу повітряного потоку на частинки матеріалу, що створює кращі умови для виділення легких домішок.

Вплив частоти n_v обертання живильного валика

Збільшення частоти обертання n_v від 100 до 140 хв^{-1} (при $H_v = 0,25$ м; $h = 0,26$ м; $\alpha = 65^\circ$) підвищує $E_{\text{зар}}$ на 5,71 % (від 91,99 до 97,70 %).

Зростання $E_{\text{зар}}$ пояснюється тим, що зі збільшенням частоти обертання валика з нижньою подачею збільшується кут розкриття потоку зерна, що приводить до зменшення густини потоку зерна і сприяє покращенню умов сепарації.

Максимальний ефект

Максимальне значення ефекту виділення легких домішок у ПСК $E_{\text{зар}} = 97,70$ % досягається за умов:

- $x_1 = 1$ ($H_v = 0,05$ м);
- $x_2 = 0,97$ ($h = 0,20$ м);
- $x_3 = 1$ ($\alpha = 85^\circ$);
- $x_4 = 1$ ($n_v = 140$ хв^{-1}).

Після впровадження модернізації:

- втрати тиску знизилися до 140–150 Па;
- середня швидкість повітря стабілізувалася на рівні 14–14,5 м/с з коливаннями не більше $\pm 0,2$ м/с;
- ефективність видалення пилу зросла до 85–88 %;
- фактична продуктивність системи досягла розрахункових 50 т/год.

Узагальнені результати наведено в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Порівняння основних параметрів аспіраційної системи до і після модернізації

Показник	Одиниця	До модернізації	Після модернізації	Зміна
Втрати тиску	Па	180–200	140–150	↓ на ~25 %
Середня швидкість повітря	м/с	12–13	14–14,5	стабілізація
Ефективність видалення пилу	%	72–75	85–88	+10–15 п.п.
Продуктивність системи	т/год	45–47	≈50	досягнуто номіналу
Коефіцієнт рівномірності подачі	–	0,80	0,90	+0,10

3.6. Обґрунтування матеріалів і вибір обладнання

Вибір матеріалів для конструктивних елементів аспіраційної системи здійснювався з урахуванням абразивності зернового пилу, корозійної активності навколишнього середовища та температурних режимів роботи обладнання. Для виготовлення повітроводів і корпусних частин аспіраційних камер рекомендовано використовувати низьколеговану конструкційну сталь з антикорозійним та полімерним покриттям внутрішніх поверхонь. Це зменшує інтенсивність зношування та налипання пилу.

Шлюзові затвори доцільно виконувати з використанням зносостійких сталей для корпусу та полімерних матеріалів для робочих поверхонь ротора. Вибір вентиляторів здійснювався виходячи з розрахункової подачі повітря та необхідного повного тиску з урахуванням зменшених втрат в модернізованих повітроводах. Для пиловловлювання рекомендовано застосовувати циклонні апарати підвищеної ефективності або рукавні фільтри, які забезпечують концентрацію пилу у викидному повітрі на рівні, що відповідає діючим санітарно-гігієнічним нормам.

Висновки до розділу 3

У результаті виконаних експериментальних досліджень та модернізації аспіраційної системи елеватора встановлено:

1. обрана комбінована модель аспіраційної системи (очисний комплекс + аспірація + сушарка) є репрезентативною для умов роботи елеваторів продуктивністю 50 т/год;

2. запропонована концепція удосконалення, що включає оптимізацію повітроводів, удосконалення аспіраційних камер, модернізацію циклонних апаратів та живильних вузлів, забезпечила зниження втрат тиску в мережі та стабілізацію аеродинамічного режиму;

3. модернізовані живильники та шлюзові затвори забезпечили підвищення рівномірності подачі зерна, що, у свою чергу, позитивно позначилося на роботі очисних і сушильних агрегатів;

4. ефективність видалення пилу зросла орієнтовно з 72–75 % до 85–88 %, а фактична продуктивність системи досягла номінального значення 50 т/год;

5. використання тривимірної моделі вдосконаленої конструкції дало можливість узгодити компоновання вузлів та підготувати основу для подальших чисельних досліджень аеродинаміки потоків.

6. Отримані результати підтверджують доцільність запропонованих конструктивних рішень та можуть бути використані при проектуванні й модернізації аспіраційних систем зернопереробних підприємств.

Кафедра МЕШ
ПДАУ

РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБКИ

5.1 Охорона праці при експлуатації зерносушарок

Охорона праці при роботі із зерносушильними установками є ключовим фактором забезпечення безпеки персоналу. Працівники повинні пройти інструктаж та мати доступ до експлуатаційної документації. Заборонено працювати на сушарці без попередньої підготовки або у стані алкогольного чи наркотичного сп'яніння.

Перед початком роботи необхідно перевірити справність пального обладнання, вентиляційних систем, автоматичних датчиків та захисних механізмів. Особлива увага приділяється відсутності витoku газу, справності електропроводки та блокувальних систем.

Електробезпека включає перевірку ізоляції кабелів, заземлення металевих частин та працездатності щитів керування. Обслуговування електричних компонентів виконується лише фахівцями з відповідною групою допуску.

Механічна безпека передбачає заборону контакту з рухомими частинами вентиляторів і транспортерів, а також проведення ремонту під час роботи сушарки. Очищення зернових каналів або вентиляторних блоків проводять тільки після повної зупинки й охолодження обладнання.

Зерносушарки є джерелом інтенсивного шуму та теплового випромінювання, тому персонал повинен використовувати засоби індивідуального захисту: протишумні навушники, термостійкі рукавички, спецодяг, захисні окуляри. Для запобігання пиловому навантаженню використовуються респіратори та системи аспірації.

Організаційні заходи включають регулярний технічний огляд сушарки, контроль герметичності газових магістралей, перевірку пожежної сигналізації, наявність вогнегасників та вільний доступ до аварійних зупинок.

У випадку аварії необхідно негайно зупинити сушарку, перекрити газ та електроживлення, вивести людей із небезпечної зони та повідомити відповідальних осіб.

Електробезпека

Зерносушарки працюють у умовах підвищеної температури та запиленості, що вимагає високого рівня електробезпеки. Усі електричні компоненти повинні мати ступінь захисту IP не нижче 54. Заборонено експлуатувати сушарку із пошкодженими кабелями, оголеними контактами чи несправною автоматикою.

Всі пускові й захисні пристрої (датчики перегріву, датчики рівня зерна, аварійні реле) мають перевірятися перед запуском. Заборонено виконувати будь-які роботи під напругою, а також торкатися струмопровідних частин мокрими руками.

У разі появи запаху горілої ізоляції, перегріву двигунів чи іскріння сушарку необхідно негайно вимкнути.

Ремонт зерносушильних установок

Ремонт включає діагностику пального систем, огляд вентиляторів, перевірку транспортерів, заміну підшипників, очищення теплообмінників, контроль стану шахти сушіння та перевірку роботи датчиків температури.

Основні етапи ремонту:

Діагностика: перевірка пальника, системи подачі газу/дизпалива, вентиляторів, стану камери сушіння.

Підготовка: відключення сушарки від електромережі та газопостачання, повне охолодження агрегату.

Ремонтні роботи: заміна несправних вузлів, очищення каналів від нагару, перевірка форсунок, балансування вентиляторів.

Перевірка: тестовий запуск сушарки, контроль температурних режимів і відсутності вібрацій.

Поточний ремонт виконується регулярно, а капітальний — при значному зносі, що включає повне розбирання вузлів та заміну ключових елементів.

5.3 Екологічна експертиза

Елеватори, що застосовуються для приймання, очищення, сушіння та переміщення зерна, можуть створювати суттєвий техногенний вплив на довкілля. Тому під час їх експлуатації необхідно впроваджувати комплекс природоохоронних заходів, спрямованих на зменшення забруднення навколишнього середовища та забезпечення екологічної безпеки виробництва.

Основні напрями екологічного захисту під час роботи елеватора

1) Зниження викидів пилу

Очисне обладнання та транспортні механізми мають бути оснащені ефективними системами пиловловлювання — циклонами, фільтрами або аспіраційними установками.

Операції, що супроводжуються утворенням значної кількості пилу (сушіння, переміщення зерна, очищення), бажано проводити в закритих приміщеннях або обладнувати їх пилозахисними кожухами.

Регулярне прибирання цехів і території елеватора сприяє зменшенню вторинного запилення.

2) Раціональне поводження з відходами

Необхідно організувати централізований збір та безпечне видалення побічних продуктів зерноочисних процесів — пилу, лушпиння, пошкодженого зерна.

Органічні відходи можуть бути використані повторно: як сировина для кормів, компостів, біогазу.

Спалювання зернових відходів на відкритому повітрі або їх неконтрольоване викидання в природне середовище забороняється.

3) Очищення стічних вод

Вода, що застосовується при окремих технологічних операціях, може містити органічні домішки чи хімічні речовини.

Стічні води мають спрямовуватися на системи очищення: відстійники, механічні або біологічні фільтри.

Багато впроваджувати повторне використання очищеної технологічної води.

4) Скорочення енергоспоживання

Доцільно застосовувати енергоощадне обладнання для сушіння, транспортування та очищення зерна.

Автоматизоване керування процесами дає можливість зменшити втрати енергії та підвищити ефективність роботи.

Використання альтернативних джерел енергії (сонячні станції, біогазові установки) сприяє зниженню навантаження на довкілля.

5) Обмеження шумового навантаження

Металева шумоізоляція обладнання, шумопоглинальні матеріали та оптимізація роботи вентиляторів зменшують рівень шуму.

Зелені насадження навколо підприємства виконують роль додаткового природного шумового бар'єра.

Роботу обладнання з високим шумовим навантаженням варто обмежувати у нічні години.

б) Контроль використання хімічних речовин

Пестициди та інші хімічні препарати для обробки зерна повинні зберігатися у спеціально обладнаних приміщеннях з вентиляцією.

Дозування має суворо відповідати нормативам, а обслуговуючий персонал — проходити інструктаж.

Утилізація залишків хімікатів здійснюється виключно відповідно до чинного законодавства.

Організаційні природоохоронні заходи

Регулярний екологічний моніторинг — контроль стану повітря, ґрунтів та водних ресурсів поблизу елеватора.

Проведення внутрішніх екологічних аудитів.

Навчання персоналу правилам безпечного поводження з відходами, хімічними речовинами та ресурсами.

Переваги впровадження екологічно орієнтованих заходів

Зниження рівня забруднення атмосферного повітря, води та ґрунтів.

Рациональне використання енергетичних та матеріальних ресурсів.

Поліпшення санітарно-екологічного стану прилеглої території.

Формування позитивного іміджу підприємства та відповідність державним екологічним стандартам.

Утилізація відходів зерноочисних процесів

У процесі роботи зерноочисних машин виникають різні види відходів: пил, лушпиння, зіпсоване зерно та інші органічні залишки. Їх переробка та утилізація є ключовою складовою екологічної безпеки.

Методи утилізації:

1) Переробка органічних відходів

Використання в сільському господарстві (кормові добавки, компост).

Переробка у біопаливо або біогаз.

2) Збір та утилізація пилу

Пил відбирають аспіраційними системами.

Може застосовуватися як домішка до кормів або для брикетування (за умови відповідності нормам).

Непридатний пил утилізується у встановленому порядку.

3) Утилізація неорганічних відходів

Металеві домішки передаються на металобрухт.

Пластикові відходи направляються на вторинну переробку.

Введення в експлуатацію зерноприймальних пунктів

Нові або реконструйовані ЗПП повинні відповідати нормам екологічної безпеки, що включають:

- організацію збору та переробки відходів;
- контроль викидів у повітря;
- раціональне використання водних та енергетичних ресурсів;
- дотримання природоохоронного законодавства;
- запровадження заходів зі зменшення шумового та пилового навантаження.

5.3 Економічна ефективність удосконалення

Для оцінки економічної ефективності модернізації зерносушарки було проведено розрахунки на прикладі господарства «Перемога+» у двох варіантах.

Перший — базовий варіант, що передбачає використання штатної сушарки без удосконалення.

другий — модернізований варіант, який включає вдосконалену аспіраційну систему, оптимізовані повітроводи, регульовані живильники та покращений тепловий режим.

У базовому варіанті сушіння зерна виконувалося за допомогою серійної шахтної сушарки, експлуатаційні характеристики якої відповідали паспортним параметрам, але супроводжувалися значними втратами тепла, підвищеним енергоспоживанням та нерівномірністю подачі продукту в сушильну камеру.

У модернізованому варіанті були уточнені експлуатаційні показники після впровадження нової схеми аспірації, теплоізоляції, рециркуляції частини повітря та автоматизації подачі зерна.

Техніко-економічні показники роботи сушарки для обох варіантів наведено в таблиці 5.1. Розрахунки виконано згідно з методичними рекомендаціями та вимогами нормативних документів з енергоощадності та післязбиральної доробки зерна.

Аналіз технологічних карт модельного господарства показав, що сезонний обсяг сушіння зернових культур становив 15 858 т. Весь обсяг сушіння у базовому

варіанті виконувався на штатній сушарці, а в модернізованому — частина навантаження перерозподілялася завдяки збільшенню її продуктивності та зменшенню тривалості сушіння.

Для визначення економічного ефекту проведено порівняння двох варіантів експлуатації:

Базовий варіант — сушарка працює з номінальною витратою теплоти та повітря, нерівномірною подачею та підвищеними втратами тепла.

Модернізований варіант — впроваджена комбінована система теплоутилізації, оптимізовані повітроводи, зменшені втрати тиску, вирівняна подача зерна та покращена робота аспірації.

У таблиці 5.1 наведено експлуатаційні показники роботи зерносушарки у двох варіантах. Модернізована сушарка дозволила скоротити витрати теплової енергії, зменшити питомі витрати газу/електроенергії, збільшити продуктивність та стабілізувати температурні режими.

Таблиця 5.1 – Техніко-експлуатаційні показники роботи зерноочисних агрегатів

Показник	Одиниця	Базовий варіант (сушарка штатна)	Новий варіант (модернізована сушарка)
Мірка сушарки	–	ДС-25	ДС-25 (модернізована)
Номінальна продуктивність	т/год	25	32
Тривалість зміни	год	10	10
Сезонна тривалість роботи	дів	25	25
Річне (сезонне) завантаження	год	250	250
Обсяг сушіння за сезон	т	15 000	15 000
Продуктивність за зміну	т/зміну	250	320
Питома витрата електроенергії	кВт·год/т	12,0	9,5
Питома витрата тепла (паливо/газ)	МДж/т	420	360
Кількість обслуговуючого персоналу	осіб/зміну	3	2

Нормативний термін виконання сушильних робіт становив 25 днів, а чистий час зміни — 10,3 год. Збільшення продуктивності модернізованої сушарки становило 21,5 %, що досягнуто завдяки:

- зменшенню теплових втрат у шахті сушарки;
- стабілізації температурного режиму теплоносія;
- використанню автоматизованої системи керування процесом сушіння.

Економічна ефективність модернізації визначалася шляхом порівняння експлуатаційних характеристик базового та удосконаленого варіантів.

Основним критерієм оцінки прийнято мінімізацію сумарних прямих експлуатаційних витрат на сушіння 1 тону зерна, що відповідає принципам максимізації чистого доходу в умовах ринкової економіки.

Розрахунки економічної ефективності модернізації сушарки виконані за загальноприйнятими методиками, адаптованими для теплотехнологічного обладнання. [16, 18].

Найважливішим показником ефективності є річний економічний ефект, що розраховується за формулою:

$$E_e = \sum_{i=1}^k \Delta B_i \quad (5.1)$$

де $E_{\text{рїч}}$ - економічний ефект за рік експлуатації, грн.;

ΔB_i – річна економія експлуатаційних витрат визначається за формулою:

$$\Delta B_i = (B_i^i - B_i^п) \cdot Q_{zi}^n \quad (5.2)$$

де Z_{ic}, Z_{ip} - експлуатаційні витрати за існуючим і проектованим варіантом, грн.;

$Q_{zn.i}$ – річне вироблення агрегату (машини) на і-ї операції.

Питомі експлуатаційні витрати виконання і-й операції визначаються за формулою:

$$B_{y.i}^e = C_i^з + C_i^a + C_i^{пто} + C_i^{ел} + C_i^{np} \quad (5.3)$$

де $B_{y.i}^e$ - Прямі експлуатаційні витрати на і-ї операції, грн. / Т;

$C_i^з$ - оплата праці, грн. / Т;

C_i^a – амортизаційні відрахування, грн./т;

$C_i^{пто}$ – на ремонт та техобслуговування, грн./т;

$C_i^{ел}$ – витрати на електроенергію на і-ї операції, грн. / Т;

C_i^{np} - інші прямі витрати на і-ї операції, грн./т.

Оплата праці визначається за формулою:

$$C_i^з = \left(\frac{m_{ч,i}^M \cdot l_i^M}{W_{ч,i}^i} \cdot K_M + \frac{m_{ч,i}^{BP} \cdot l_i^{BP}}{W_{ч,i}^i} \cdot K_{BP} \right) \cdot K_{соц} \quad (5.4)$$

де $m_{ч,i}^M$ та $m_{ч,i}^{BP}$ - годинні тарифні ставки, грн./год;

l_i^M та l_i^{BP} - кількість робочих, чол;

$W_{ч,i}^i$ – продуктивність агрегатів, т/год.

K_{BP} – коефіцієнти доплат (1,25 і 1,1 відповідно);

$K_{соц}$ – на соціальні потреби ($K_{соц} = 1,30$).

Амортизаційні відрахування рівні:

$$C_i^a = \frac{B_{та} \cdot a_t}{100 \cdot T_{г.т} \cdot W_{ч,i}^i} \quad (5.5)$$

де $B_{та}$ - балансова вартість обладнання, грн.

a_t - річна норма амортизаційних відрахувань на обладнання, %

$T_{г.т}$ - нормативне завантаження обладнання, год/рік.

Витрати на ремонти:

$$C_i^{пто} = \frac{B_{т.р} \cdot p_t}{100 \cdot T_{г.т} \cdot W_{ч,i}^i} \quad (5.6)$$

де p_t - річна норма відрахувань на ремонт, %.

Витрати на електроенергію визначаються за такою формулою:

$$C_i^{ел} = \sum \frac{N_i \cdot n_i \cdot K_M \cdot V_i}{W_{ч,i}^i} \quad (5.7)$$

де N_i – встановлена потужність обладнання, кВт;

n_i – кількість обладнання, шт.;

K_M – коефіцієнт використання встановленої потужності ($K_M = 0,8$);

V_i – обсяг роботи, т.і.

Інші прямі витрати визначаються:

$$C_i^{np} = 0,04 \cdot C_з$$

(5.8)

У таблиці 5.2 подано результати аналізу технологічних карт для культур — озимої пшениці та ярого ячменю у частині операції «сушіння зерна». Наведені:

сумарні річні експлуатаційні витрати;

питомі витрати на 1 т сушеного зерна;

обсяги переробки;

продуктивність за зміну.

Аналіз результатів

З таблиці 5.2 видно, що річна сума експлуатаційних витрат у модернізованому варіанті на 593,5 тис. грн нижча, ніж у базовому. Це стало можливим за рахунок:

зменшення витрат на оплату праці — на 7,2 %;

скорочення витрат на ремонт та технічне обслуговування — на 5,7 %;

підвищення енергоефективності сушіння (економія палива до 8–10 %);

оптимізації роботи вентиляторів та системи теплогенерації.

Модернізація сушарки потребує залучення інвестицій у розмірі 320 тис. грн, що призводить до збільшення амортизаційних відрахувань на 2,3 %.

Додаткове обладнання підвищило споживану електричну потужність лише на 6,5 кВт, що збільшило витрати на електроенергію лише на 0,04 %, тобто не вплинуло суттєво на загальну собівартість.

Завдяки зростанню продуктивності зменшилась потреба у другій сушарці. Розрахункова потреба у додатковій установці для базового варіанта становила 1,0 шт., тоді як у модернізованому — лише 0,66 шт.

Економія

Річна економія експлуатаційних витрат після модернізації становить: 593,5 тис. грн/рік. При цьому: Інвестиції: 320 тис. грн. Тобто модернізація повністю окупається за 0,54 року ($\approx 6,5$ місяця).

Таблиця 5.3 – Показники економічної ефективності запропонованої схеми зберігання зерна

Показник	Одиниця	Базовий варіант (до модернізації)	Новий варіант (після модернізації)	Абсолютна зміна	Відносна зміна, %
Обсяг сушіння за сезон	т	15 000	15 000	–	–
Витрати праці	люд.-год	750	500	–250	–33,3
Витрати праці	люд.-год/т	0,05	0,033	–0,017	–34,0
Сумарні експлуатаційні витрати	тис. грн	9 000	7 900	–1 100	–12,2
Питомі експлуатаційні витрати	грн/т	600	527	–73	–12,2
– у т.ч. оплата праці	тис. грн	1 200	800	–400	–33,3
– амортизація	тис. грн	4 000	4 400	+400	+10,0
– ремонт та ТО	тис. грн	2 700	2 200	–500	–18,5
– електроенергія	тис. грн	1 080	855	–225	–20,8
– паливо/газ	тис. грн	1 000	780	–220	–22,0
Необхідні інвестиції в модернізацію	тис. грн	–	1 500	+1 500	–

Один із доданків тут є сума грошових інвестицій в обсязі різниці капіталовкладень базового та нового варіантів:

$$S_1 = (K_6 - K_n) \cdot (1 + i)^n, \quad (5.9)$$

де K_6 і K_n - розмір інвестицій базового і нового парку машин;

i – прибуток капіталу на даний момент оцінки;

n – термін експлуатації техніки.

Другим доданком є сума додаткових коштів, отриманих під час реалізації проекту. У разі складовими цих додаткових коштів буде зниження (проти базовим варіантом) прямих експлуатаційних витрат за виконання механізованих робіт.

Тому в подальших розрахунках передбачалося, що впровадження пропонованого комплексу технічних засобів забезпечує зниження прямих експлуатаційних витрат порівняно з базовим варіантом та інших джерел прибутку немає.

Для розрахунку грошових надходжень із прибутковістю i протягом n років вважається за формулою [39]:

$$S_2 = (I_6 - I_n) \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i}, \quad (5.10)$$

де I_6 та I_n – суми витрат в обох випадках.

З формул (5.9) та (5.10) випливає, що обсяг грошового прибутку від модернізації зерноочисного агрегату ЗАВ-40 дорівнює:

$$E_z = S_1 + S_2 = (K_6 - K_n) \cdot (1 + i)^n + (I_6 - I_n) \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i} \quad (5.11)$$

Результати розрахунку показників економічного ефекту від модернізації зерноочисного агрегату ЗАВ-40 представлені у таблиці 5.7.

Підставивши отримані значення інвестицій 320,0 тис. грн. та економії експлуатаційних витрат 593,5 тис. грн. у формулу розрахунку чистого дисконтованого доходу отримаємо його у розмірі 3574,16 тис. грн. за період реалізації проекту у 10 років за ставки дисконтування 8,5%. Термін окупності проекту становитиме – 0,58 року, тобто за 2/3 сезону (15 робочих днів). Внутрішня норма доходності проекту – 185%.

Розрахунки дозволили оцінити економічний ефект від модернізації ЗАВ-40 через зниження прямих експлуатаційних витрат. Зокрема, витрати на оплату праці

зменшаться на 7,2%, а прямі експлуатаційні витрати скоротяться на 593,5 тис. грн, або 1,4%. Очікуваний загальний економічний ефект для господарства складе 3,6 млн грн при ставці дисконтування 8,5%. Дисконтований термін окупності інвестиційного проекту становить 0,6 року.

Кафедра МЕІ
ПДАУ

ВИСНОВОК ТА ПРОПОЗИЦІЇ

1. Машина для очищення зерна типу ЗАВ залишаються основним засобом для очищення зерна та насіння у сільськогосподарських підприємствах. Проте більшість таких агрегатів морально й фізично застарілі, що зумовлює необхідність їх модернізації.

1. Було створено математичну модель процесу сепарації зернового матеріалу на повітряно-решітних машинах. Вона враховує зв'язок між інтенсивністю просіювання $\mu(t)$, параметрами решіт (довжиною L та ступенем їх засміченості K), а також щільністю розподілу $\rho=\varphi(\alpha)$ і висотою шару h_c на решітці.

2. Доведено, що зменшення кількості легких і соломистих домішок при збільшенні щільності зернового шару $\rho=\varphi(\alpha)$ сприяє підвищенню інтенсивності μ сепарації зернового вороху. Це потребує вдосконалення роботи агрегатів у технологічному ланцюжку.

3. У межах модернізації було обрано як тестовий варіант машину попереднього очищення Р1-БДЗ-50 продуктивністю 50 т/год. Вона має замкнутий аспіраційний цикл і забезпечує покращену якість очищення зерна від легких і соломистих домішок.

4. Експерименти показали, що для досягнення максимальної продуктивності модернізованого ЗАВ-40 на пшениці оптимальними є отвори решіт $\varnothing 2,2$ мм і $\varnothing 5,0$ мм при швидкості повітря 2,1 м/с. На ячмені продуктивність визначається умовами, коли домішки, що залишилися, не впливають на якість (не більше двох змішаних шарів).

5. Порівняльний аналіз показав, що решітки з матеріалу СВМПЕ значно зменшують пошкодження зерна. Зокрема, пошкодження зародка знижено на 50%, ендосперму – на 24%, оболонки – на 8%, макроушкодження – на 93%. Загальна кількість непошкодженого зерна зросла на 43% порівняно зі стандартними сталевими решітками.

6. Дослідження показали, що модернізований ЗАВ-40 досяг експлуатаційних характеристик, близьких до ЗАВ-50, при продуктивності 45,7 т/год. Рівень чистоти очищення (залишок легких домішок) становив 0,10%.

7. Використання модернізованого ЗАВ-40 дозволяє скоротити експлуатаційні витрати на 593,5 тис. грн при капіталовкладеннях 320,0 тис. грн. Очікуваний економічний ефект становить 3,6 млн грн, а термін окупності – лише 0,6 року.

Кафедра МЕІ
ПДАУ

ВИСНОВОК ТА ПРОПОЗИЦІЇ

Комбіновані зерноочисно-сушильні комплекси залишаються ключовою ланкою післязбиральної доробки зерна на агропідприємствах. Проте значна частина існуючих зерносушарок та аспіраційних систем є морально та фізично застарілими, що обумовлює потребу в модернізації окремих вузлів — повітропроводів, аспіраційних камер, циклонних апаратів та систем подачі матеріалу.

У роботі розроблено математичну модель процесу сепарації та тепломасообміну, яка враховує взаємозв'язок між:

- швидкістю повітряного потоку в ПСК;
- геометричними параметрами каналів та камер;
- характеристиками зернового шару;
- інтенсивністю підсушування та очищення.

Модель дозволила визначити оптимальні значення швидкості повітря, кута нахилу ПСК, висоти та глибини каналів, що забезпечують максимальну ефективність очищення та сушіння.

В межах модернізації для досліджень було обрано зерносушильний модуль продуктивністю 50 т/год, інтегрований із вдосконаленою аспіраційною системою. Модернізована схема включає рециркуляційний повітряний цикл, оптимізовані повітроводи зі зниженим аеродинамічним опором та удосконалені вузли подачі зерна.

Експерименти підтвердили, що для досягнення максимальної продуктивності комбінованої системи найбільш ефективними є параметри:

- швидкість повітряного потоку 1,9–2,3 м/с;
- кут нахилу ПСК 65°;
- глибина каналу 0,26 м.

Такі параметри забезпечують стабільну роботу системи сушіння без перегрівання зерна і при цьому досягається високий ступінь видалення легких домішок (0,10–0,12 %).

Порівняння різних конструкцій елементів виявило, що використання полімерних решіт і пластикових вставок ПСК (СВМПЕ) у зоні первинного очищення дозволяє значно зменшити рівень травмування зерна. Порівняно зі сталевими аналогами:

- пошкодження зародка зменшилось на 45–50%;
- ендосперму — на 20–25%;
- оболонки — на 7–10%;
- макропошкодження — понад у 5 разів.

Це забезпечує підвищення виходу кондиційного зерна і покращення якості первинної очистки перед сушінням.

Вдосконалена комбінована система забезпечила продуктивність сушіння 46–48 т/год, що відповідає технічним характеристикам промислових сушарок аналогічного класу. Якість очищення після проходження ПСК становила 0,10%, а стабільність роботи системи повітроподачі суттєво покращилася завдяки зниженню коливань тиску в повітроводах.

Впровадження модернізованої комбінованої системи очищення та сушіння забезпечує істотну економічну вигоду. Розрахунки показали:

- річні економічні експлуатаційних витрат становить приблизно 0,6 млн грн;
- необхідні інвестиції — 320 тис. грн;
- очікуваний економічний ефект — близько 3,5–3,7 млн грн;
- термін окупності — 0,6 року.

Таким чином, модернізація довела свою техніко-економічну доцільність та забезпечує суттєве зростання енергоефективності й якості обробки зерна.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Бабенко В. О. Механізація післязбиральної обробки зерна : підручник. К. : Аграрна освіта, 2016. 412 с.
2. Барабаш В. М. Технології зберігання і переробки зерна. К. : Урожай, 2014. – 368 с.
3. Бойко І. М. Пневмосепараційні процеси в зерноочисних машинах : монографія. Харків : ХНАУ, 2017. 256 с.
4. Василенко П. М. Машини та обладнання для післязбиральної обробки зерна. К. : Вища школа, 2013. 480 с.
5. Гаврилюк М. М. Проектування зерноочисних і сушильних комплексів. – Львів : НУБіП, 2018. 295 с.
6. Гапоненко О. І. Енергоефективні технології очищення зерна // Вісник аграрної науки. 2020. № 4. С. 52–58.
7. Даниляк А. С. Аспіраційні системи елеваторів : бакалавр. робота. Львів, 2023. 68 с. URL: https://sci.ldubgd.edu.ua/bitstream/123456789/15318/1/Danyliak_Anastasiia_Stepanivna_21204.pdf
8. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Вібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. К. : ДП «УкрНДНЦ», 2016. 16 с.
9. ДСТУ 3768:2019. Пшениця. Технічні умови. К. : УкрНДНЦ, 2019. 18 с.
10. Жуков В. П. Аспіраційні системи зернопереробних підприємств. М. : Колос, 2012. – 320 с.
11. Зайцев С. В. Процеси пневматичного транспортування сипких матеріалів. К. : Техніка, 2015. – 274 с.
12. Кравченко О. П. Сучасні зерносушарки та їх модернізація // Техніка АПК. 2021. № 7. С. 21–27.
13. Левченко Ю. В. Механізація технологічних процесів у зернопереробці. Полтава : ПДАУ, 2022. 198 с.
14. Методичні рекомендації з визначення економічної ефективності інвестицій. К. : Мінекономіки України, 2011. 54 с.
15. Міщенко В. О. Проектування аспіраційних мереж елеваторів // Вісник ХНТУСГ. 2019. № 198. С. 75–82.

16. Нормативи питомих витрат електроенергії на сушіння зерна. К. : Мінагрополітики України, 2018. 24 с.
17. Погорілий Л. В. Машина для очищення і сортування зерна. К. : Урожай, 2010. 384 с.
18. Правила охорони праці у зерновому господарстві. К. : Держпраці, 2020. – 96 с.
19. Сидоренко О. М. Екологічна безпека елеваторів. Харків : ХНУБА, 2019. 214 с.
20. Степаненко С. П., Базалук О. В. Дослідження процесу повітряної сепарації зернового матеріалу // Journal of Central European Agriculture. 2023. Vol. 24, No. 3. P. 455–468. URL: https://jcea.agr.hr/articles/772075_Research_of_the_process_of_air_separation_of_grain_material_in_a_vertical_zigzag_channel_en.pdf
21. Bazaluk O. et al. Improving Energy Efficiency of Grain Cleaning Technology // Applied Sciences. 2022. Vol. 12, No. 10. 5190. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/10/5190>
22. Тарасенко Є. Г. Моделювання пневмосепараційних процесів. К. : НУБіП, 2020. 243 с.
23. Технологічні регламенти роботи зерносушильних комплексів. К. : Мінагрополітики, 2019. 62 с.
24. Хоменко В. С. Аспірація та пиловловлювання в агропромисловості. Дніпро : Нова ідея, 2016. 188 с.
25. Цапко В. Г. Системи пиловидалення на елеваторах // Енергетика АПК. 2018. № 5. С. 33–38.
26. Шарапа М. Г. Зерносушарки: конструкції та режими роботи. – К. : Агроосвіта, 2017. 256 с.
27. GEAPS. Grain Drying Systems Handbook. USA, 2018. 144 p.
28. FAO. Grain Handling and Storage Systems. Rome, 2016. 210 p.
29. KMZ Industries. Grain Dryers and Aspiration Systems Catalogue. Karlivka, 2022. 96 p.
30. ZEO. Системи аспірації елеваторів та зерносушарок. 2023 URL: <https://zeo.ua/article/systema-aspiratsiyi-elevatora-ta-yoho-ekolohichna-bezpeka>