

Центральноукраїнський національний технічний університет
ЦЗДО
Кафедра сільськогосподарського машинобудування

“Допущено до захисту”

зав. кафедрою СГМ

к.т.н., професор

_____Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ

“ ____ ” _____ 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти
на тему:

Модернізація зерносушарки А1-ДП-50 з удосконаленням
конструкції повітро-розподільних коробів

Виконав здобувач вищої освіти IV
курсу, групи ГМ-22з-1

ОПП «Галузеве машинобудування»

спеціальності 133 «Галузеве
машинобудування»

_____Толмачов Сергій Григорович

« ____ » _____ 2026 р.

Керівник проекту

доц., канд. техн. наук

_____Дмитро БОГАТИРЬОВ

« ____ » _____ 2026 р.

Рецензент

доц., канд. техн. наук

_____Катерина ВАСИЛЬКОВСЬКА

« ____ » _____ 2026 р.

м. Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет ЦЗДО

Кафедра Сільськогосподарського машинобудування

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський) рівень

Галузь знань 13 «Механічна інженерія»

Спеціальність 133 «Галузеве машинобудування»

Освітньо-професійна програма «Галузеве машинобудування»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ

« » 2026 року

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ
ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

Толмачов Сергій Григорович

1. Тема роботи: «Модернізація зерносушарки А1-ДП-50 з удосконаленням конструкції повітро-розподільних коробів»
 2. Керівник роботи Богатирьов Д.В., к.т.н., доцент
 3. Строк подання студентом роботи до захисту 05.06.2026
 4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи модернізація сушарки агрокультур, яка в цілому направлена на підвищення продуктивності і якості процесу видалення вологи.
 5. Перелік графічного матеріалу 1. Сушарка – складальне креслення; 2. Модернізований вузол – складальне креслення; 3. Деталювання.
- Всього 3 аркуші формату А1.

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1-6	Богатирьов Д.В., доцент, к.т.н.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Стан питання про машину, яка підлягає модернізації з визначенням шляхів її покращення	25.05.26 р.	
2	Конструкторська частина	30.05.26 р.	
3.	Виконання графічної частини	05.06.26	
4.	Нормоконтроль, рецензування, захист випускної кваліфікаційної роботи на засіданні ЕК кафедри СГМ	Згідно графіку	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2026 р.

Підпис керівника

_____ Богатирьов Д.В.
(прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2026 р.

Підпис здобувача

_____ Толмачов С.Г.
(прізвище та ініціали)

ВСТУП

Актуальність теми. Післязбиральна обробка та зберігання зерна є найважливішими ланками в загальному технологічному ланцюгу виробництва сільськогосподарської продукції. Проте свіжозібрана зернова маса, яка надходить від комбайнів на зернотoki та хлібоприймальні підприємства України, у більшості випадків характеризується підвищеною вологістю (до 20% для зернових та до 12% для олійних культур). За таких умов фізіологічні процеси в зерновій масі різко активізуються, що супроводжується інтенсивним диханням, розвитком мікрофлори та шкідників, і, як наслідок, призводить до швидкого самозігрівання та псування врожаю. Своєчасне штучне сушіння є єдиним надійним методом зупинки цих небажаних процесів і приведення зерна до кондиційної вологості, яка гарантує довгострокову схоронність його харчових, фуражних та насіннєвих якостей.

У структурі сучасного агропромислового комплексу конвективні шахтні зерносушарки (зокрема базові серійні моделі А1-ДП-50 та ДСП-32-ОТ2) є основним технологічним обладнанням для термічної обробки сировини. Проте експлуатація цих установок пов'язана з надзвичайно високим споживанням органічного палива та значною матеріаломісткістю конструкції. В умовах сучасної енергетичної кризи в Україні, дефіциту та постійного подорожчання традиційних енергоносіїв (природного газу, рідкого палива), завдання модернізації існуючих конструкцій зерносушарок з метою зниження питомих витрат тепла, зменшення металоємності коробових систем та підвищення ресурсу випускних вузлів є надзвичайно актуальною науково-практичною проблемою галузевого машинобудування.

					ДПА 00.000 ПЗ			
Зм	Арк	№ докум.	Підпис	Дат				
Розроб.	Толмачов				Пояснювальна записка	Літ.	Аркуш	Аркушів
Перевір.	Богатирьов						5	40
						ЦНТУ,		
Н. контр	Артеменко					гр. ГМ-223-1		
Затв.	Васильковський							

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана на кафедрі сільськогосподарського машинобудування Центральноукраїнського національного технічного університету відповідно до напрямів науково-дослідних робіт університету з удосконалення післязбиральної обробки зерна та впровадження енергозберігаючих технологій у сільськогосподарському виробництві.

Мета і завдання дослідження. Метою кваліфікаційної роботи є підвищення техніко-економічної ефективності, експлуатаційної надійності та продуктивності шахтної зерносушарки А1-ДП-50 шляхом впровадження пристрою для рекуперації тепла відпрацьованого агента сушіння, оптимізації геометричних параметрів коробової системи та вдосконалення приводу випускного механізму.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

Проаналізувати сучасний стан технологій конвективного сушіння зерна та конструкції шахтних сушарок для виявлення резервів підвищення їх енергоефективності.

Обґрунтувати схему інтеграції та конструктивні параметри зернообмінника для попереднього підігріву сирого зерна за рахунок утилізації теплоти відхідних газів.

Модернізувати повітророзподільну систему сушильної шахти за рахунок впровадження перфорованих трикутних коробів оптимізованої маси та конфігурації.

Розробити раціональну конструкцію випускного механізму безперервної дії зі зменшеною довжиною привідної тяги та довговічними пилозахищеними опорами кочення рухомої рами.

Виконати комплексні теплові, конструктивні та міцнісні розрахунки модернізованих вузлів зерносушарки.

					ДПА 00.000 ПЗ	Арк
						6
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Оцінити екологічну безпеку та розрахувати показники економічної ефективності запропонованих рішень для машинобудівного виробництва та споживача.

Об'єкт дослідження – процес конвективного тепломасообміну при сушінні зерна та кінематика роботи розвантажувальних пристроїв у шахтних зерносушарках конвективного типу.

Предмет дослідження – конструктивні й технологічні параметри рекупераційного зернообмінника, перфорованих повітророзподільних коробів та випускного механізму безперервної дії зерносушарки А1-ДП-50.

Методи дослідження. При виконанні роботи використано: методи системного аналізу науково-технічної літератури та патентних джерел; загальні закони термодинаміки та теплопередачі для розрахунку теплових балансів; методи теорії машин і механізмів при кінематичному аналізі приводу; методи опору матеріалів та деталі машин для перевірочних розрахунків елементів конструкції на міцність і довговічність; методи математичної статистики та економічного аналізу.

Наукова новизна отриманих результатів. У роботі отримали подальший розвиток наукові положення щодо інтенсифікації процесу сушіння зернових культур у щільному шарі конвективним способом за рахунок попереднього термічного оброблення сировини у зернообміннику утилізаційного типу, що дозволяє раціонально перерозподілити теплові потоки відпрацьованого агента сушіння без додаткових витрат палива.

Практичне значення отриманих результатів. Запропоновані технічні рішення дозволяють підвищити продуктивність зерносушарки А1-ДП-50. Розроблена конструкція нових перфорованих коробів забезпечує зниження металоємності установки. Результати розробок мають пряму практичну цінність для конструкторських бюро підприємств сільськогосподарського машинобудування та безпосередньо для експлуатації на сучасних елеваторних комплексах України.

					ДПА 00.000 ПЗ	Арк
						7
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

2. СТАН ПИТАННЯ ПРО МАШИНУ, ЯКА ПІДЛЯГАЄ МОДЕРНІЗАЦІЇ

2.1. Аналіз технологічних способів та фізичних закономірностей процесу сушіння зерна.

Процес сушіння зерна та насіння сільськогосподарських культур є складною тепломасообмінною операцією, перебіг якої супроводжується значними енергетичними витратами. З фізичного погляду, сушіння капілярно-пористих колоїдних тіл, якими є зернівки, поєднує в собі взаємопов'язані явища тепло- і вологопереносу:

- Передачу теплової енергії від сушильного агента (гарячого повітря або суміші топкових газів із повітрям) до зовнішньої оболонки та внутрішніх шарів зерна.

- Рух вільної та зв'язаної води з внутрішніх зон (ендосперму) до поверхневих шарів зернівки під дією градієнтів концентрації води (вологопровідність) та температур (термовологопровідність).

- Випаровування води з поверхні зерна та її подальшу дифузію (транспортування) у потік відпрацьованого агента сушіння.

Ефективність видалення води без втрати життєздатності зернівки залежить від низки факторів: температури агента сушіння, товщини шару матеріалу, швидкості його переміщення та інтенсивності циркуляції газу. У практиці сільськогосподарського виробництва застосовують три основні технологічні класи сушіння зерна:

1. Теплове сушіння (конвективне, вакуумне, кондуктивне). Найбільш поширене в промислових масштабах. За конвективним принципом працюють шахтні, рециркуляційні, барабанні та підлогові сушарки. Контактний (кондуктивний) спосіб, заснований на дотику зерна до нагрітих робочих поверхонь, потребує значно вищих капітальних витрат і в зерноочисно-сушильних комплексах застосовується обмежено.

2. Сорбційне (контактно-сорбційне) сушіння. Базується на контакті

					ДПА 00.000 ПЗ		Арк
							8
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата			

вологого зерна з вологопоглинальними матеріалами (силікагель, суха тирса, зневоднене зерно), використовується здебільшого в лабораторних умовах.

3. Механічне зневоднення (відтискання, центрифугування). Застосовується виключно на борошномельних заводах для поверхневого осушення зерна після його промивання у мийних машинах.

У сучасному агропромисловому виробництві конвективне сушіння у вертикальних шахтних зерносушарках є домінуючим технологічним рішенням завдяки безперервності процесу, високій продуктивності та можливості автоматизації режимів роботи.

2.2. Конструкція, технічні параметри та агротехнічні вимоги експлуатації базової зерносушарки А1-ДП-50.

Стаціонарна шахтна зерносушарка А1-ДП-50 (виробництва ПАТ «Карлівський машинобудівний завод» — KMZ Industries, Україна) призначена для сушіння продовольчого, фуражного та насіннєвого зерна колосових, круп'яних, бобових та олійних культур. Установка розрахована на експлуатацію в усіх ґрунтово-кліматичних зонах України та є типовим представником двошахтних зерносушарок усмоктувального типу.

Основні технічні характеристики базової зерносушарки А1-ДП-50:

- Продуктивність при зниженні вологості пшениці з 20% до 14% : 32–50 т/год ;
- Витрата умовного палива: 8–9 кг/т висушеного зерна;
- Питома витрата тепла на 1 кг випаруваної вологи: 4800–5500 кДж/кг ;
- Сумарна встановлена потужність електродвигунів: 110 кВт ;
- Загальна металоемність сушильної шахти: близько 42 тонн .

					ДПА 00.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		9

Конструктивно базова сушарка А1-ДП-50 складається з вертикального металевго корпусу (шахти), всередині якого в шаховому порядку горизонтальними рядами розташовано п'ятикутні повітророзподільні короби. Простір між коробами заповнений зерном, що гравітаційно переміщується зверху вниз. Подача гарячого повітря від топкового пристрою здійснюється під розрідженням, створеним потужними вентиляторами-димососами. Агент сушіння проходить через підвідні короби, фільтрується крізь щільний рухомий шар зерна, поглинає вологу і через відвідні короби викидається в атмосферу. Для збереження біологічних властивостей зерна, його технологічної та насіннєвої цінності процес сушіння у шахтах А1-ДП-50 повинен суворо підпорядковуватися нормативно встановленим температурним та вологосним показникам. Основні агротехнічні обмеження та режими термообробки для різних культур наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Агротехнічні вимоги до сушіння сільськогосподарських культур у зерносушарці А1-ДП-50

Культура	Призначення зерна	Початкова вологість, %	Кінцева (базисна) вологість, %	Гранична температура нагрівання зерна, °С	Гранична температура агента сушіння, °С
Пшениця, жито, ячмінь	Насіннєве	18–24	13–14	43–45	60–70
	Продовольче, фуражне	18–28	14.0	50–55	80–110
Кукурудза	Насіннєве	20–35	13–14	43–45	60–70
	Продовольче, крохмалепаток ове	20–35	14.0	50.0	90–110
	Кормове (фуражне)	20–35	14.0	55–60	110–130
Соняшник	Насіннєве	12–20	7–8	40–45	55–60
	Товарне (олієекстракційне)	12–24	6–7	50–55	65–80

Культура	Призначення зерна	Початкова вологість, %	Кінцева (базисна) вологість, %	Гранична температура нагрівання зерна, °С	Гранична температура агента сушіння, °С
Ріпак	Насіннєве	12–18	7–8	35–40	50–55
	Промислове	12–20	7–8	45–50	60–70
Горох, соя	Продовольче та насіннєве	18–24	14–15	35–40	50–65

2.3. Критичний аналіз та недоліки коробової системи базової сушарки.

Коробова система шахтної сушарки безпосередньо визначає якість тепломасообміну та гідродинаміку потоку сушильного агента. Конструктивний аналіз базової коробової системи А1-ДП-50 виявив такі серйозні недоліки:

1. Наявність застійних зон та локальний перегрів. Базові повітророзподільні короби мають п'ятикутний поперечний переріз із глухими суцільними стінками. Під верхніми похилими гранями таких коробів утворюються зони з низькою рухливістю зерна (застійні зони). Зерно в цих зонах піддається тривалому тепловому впливу без належного перемішування, що призводить до локального перегріву вище критичної температури ($50\text{--}55\text{ }^{\circ}\text{C}$). Це викликає розтріскування оболонок, денатурацію білків та різке зниження схожості насіннєвого матеріалу.

2. Високий аеродинамічний опір сушильної шахти. Глухі грані базових коробів різко обмежують ефективну площу живого перерізу для проходження повітря. Швидкість руху повітряного потоку у звуженнях між коробами різко зростає, що викликає значні втрати тиску. Загальний аеродинамічний опір шахти досягає:

$$\Delta P_{\text{шахти}} \approx 800\text{--}1100 \text{ Па}$$

Це змушує встановлювати вентилятори підвищеної потужності, що призводить до перевитрати електричної енергії.

3. Надмірна металоємність. Одинична маса базового п'ятикутного короба, виготовленого з листової сталі товщиною $2,0 \text{ мм}$, становить 14 кг . При загальній кількості коробів у шахті $N = 970 \text{ шт.}$, загальна маса тільки коробової системи становить:

$$M_{\text{коробів}} = 970 \times 14 = 13580 \text{ кг} = 13,58 \text{ т}$$

Це створює значне статичне навантаження на тримальний каркас та фундамент сушарки.

Для обґрунтування вибору проекрованої коробової системи проведемо детальний порівняльний аналіз роботи різних конструктивних типів повітророзподільних коробів (Таблиця 2.2).

Таблиця 2.2 — Порівняльний аналіз робочих параметрів різних типів повітророзподільних коробів

Конструктивний тип короба	Схематичний профіль та конструктивні особливості	Нерівномірність сушіння та наявність застійних зон	Питомий аеродинамічний опір ряду коробів, Па	Одинична маса короба, кг	Переваги та недоліки
Базовий п'ятикутний глухий короб (А1-ДП-50)	П'ятикутний рівнобічний профіль із суцільного металевого листа товщиною $2,0 \text{ мм}$ без отворів.	Висока. Під верхнім ребром утворюються призматичні зони зависання («застійні кишені») зерна заввишки до $45\text{--}60 \text{ мм}$.	$120\text{--}150$	$14,0$	Переваги: Висока механічна жорсткість на згинання. Недоліки: Локальний перегрів зерна, високий опір проходженню газу, значна вага.

Конструктивний тип короба	Схематичний профіль та конструктивні особливості	Нерівномірність сушіння та наявність застійних зон	Питомий аеродинамічний опір ряду коробів, Па	Одинична маса короба, кг	Переваги та недоліки
Трикутний суцільний короб (традиційні європейські сушарки)	Трикутний гостроверхий профіль із суцільного листа металу. Кут при вершині $\alpha = 30-45^\circ$.	Середня. Зменшує висоту застійної зони над коробом до 15–20 мм, але повітря обтікає короб по замкнутому контуру.	95–110	13,2	Переваги: Краще сходження зерна. Недоліки: Зберігається нерівномірність розподілу агента сушіння у міжкоробовому просторі.
Напівкруглий перфорований короб (система Bühler)	Циліндричний склепінчастий профіль з бічною та нижньою дрібною перфорацією.	Низька. Практично немає застійних зон, проте ускладнюється рівномірність сходження зерна по криволінійній поверхні.	75–85	11,8	Переваги: Низький опір повітря. Недоліки: Висока складність виготовлення перфорації на криволінійному профілі, схильність до забивання отворів дрібними домішками.
Проектований трикутний перфорований короб (модернізація)	Трикутний профіль з перфорованою нижньою гранню (щілинні або круглі отвори), товщина листа	Мінімальна. Кут вершини 40° забезпечує безперешкодне сходження зерна. Перфорація знизу активно	60–70	12,5	Переваги: Відсутність зон зависання зерна, рівномірне вологовиділення, мінімальний опір потоку, зниження

Конструктивний тип короба	Схематичний профіль та конструктивні особливості	Нерівномірність сушіння та наявність застійних зон	Питомий аеродинамічний опір ряду коробів, Па	Одинична маса коробка, кг	Переваги та недоліки
	1, 5–1, 8 мм	продуває зерно безпосередньо під основою короба.			загальної маси шахти на 1455 кг

2.4. Конструктивні недоліки та проблеми експлуатації випускного механізму.

Випускний механізм періодичної дії кареткового типу, встановлений у нижній частині шахти А1-ДП-50, регулює швидкість розвантаження сушарки та безпосередньо впливає на експозицію сушіння. Під час тривалої експлуатації базового вузла було зафіксовано такі конструктивні недоліки:

1. Низька жорсткість та люфти привода. Зворотно-поступальний рух хитній розвантажувальній каретці передається від приводного редуктора через довгу вертикальну тягу довжиною $L = 2,65 \text{ м}$. Під впливом знакозмінних навантажень довга тяга зазнає поздовжнього згину та пружних деформацій. Це викликає значні люфти, призводить до нерівномірності кроку каретки та порушує точність дозування випуску зерна.

2. Швидкий знос опорних вузлів рами розвантажувача. Рухома рама випускного пристрою спирається на ролики, які здійснюють рух по напрямних нерухомої опорної рами. У базовій конструкції ці ролики являють собою прості сталеві диски, посаджені вільною посадкою безпосередньо на сталеві осі без використання підшипників кочення чи ковзання. В умовах високої концентрації зернового пилу та підвищеної вологості у зоні випуску відбувається інтенсивний абразивний знос пари «вісь-ролик». Це вимагає регулярного

змащування опор через кожні 2400 годин роботи, що в умовах безперервного сезону сушіння є важкодосяжним та призводить до заклинювання каретки.

3. Нераціональна система стабілізації навантажень. Компенсація динамічних зусиль при реверсивному русі рами здійснюється чотирма гвинтовими пружинами. Через їхню нерівномірну жорсткість та несинхронну роботу виникає значний перекид рухомої рами у горизонтальній площині, що викликає підвищений знос привода та збільшує споживання потужності.

2.5. Критичний аналіз та недоліки конструкції базової сушарки у порівнянні з закордонними аналогами.

Детальний аналіз вітчизняного досвіду експлуатації сушарок А1-ДП-50 виявив низку хронічних конструктивних недоліків, які знижують енергетичну ефективність процесу та експлуатаційний ресурс робочих органів. Світові лідери у виробництві елеваторного обладнання (такі як Bühler, RIELA, Tornum, LAW) успішно усувають подібні проблеми шляхом використання оптимізованої геометрії внутрішніх каналів, систем рекуперації тепла та впровадження пилозахищених безперервних розвантажувальних механізмів.

У таблиці 2.3 наведено систематизований аналіз недоліків сушарки А1-ДП-50 та закордонний досвід їх усунення.

Таблиця 2.3 — Виявлені недоліки зерносушарки А1-ДП-50 (KMZ Industries) та закордонні інженерні рішення для їх усунення

Вузол зерносушарки	Виявлені недоліки базової моделі А1-ДП-50	Закордонні аналоги та технології усунення недоліків	Ефект від запозиченого рішення
Коробова повітророзподільна система	1. П'ятикутна геометрія коробів із суцільними (глухими) стінками спричиняє	У сушарках Bühler (Швейцарія) та RIELA (Німеччина) застосовують трикутні або	Усунення застійних зон, рівномірне вологовиділення по всьому перерізу шахти, зниження

Вузол зерносушарки	Виявлені недоліки базової моделі А1-ДП-50	Закордонні аналоги та технології усунення недоліків	Ефект від запозиченого рішення
	утворення застійних («мертвих») зон під верхньою похилою гранню коробів, що призводить до локального перегріву зерна. 2. Висока металоємність (14 кг/шт.) при загальній кількості 970 шт. . 3. Велика швидкість повітряного потоку у звуженнях між глухими коробами створює високий аеродинамічний опір сушильної камери ($\Delta P \approx$).	трапецієподібні перфоровані коробки з легованої сталі з покриттям Magnelis. Нижня грань коробів має перфорацію, що забезпечує вільний двосторонній вихід теплоносія.	аеродинамічного опору шахти на 25–30% , полегшення конструкції коробової системи.
Система тепловикористання (Топково-вентиляторний блок)	Пряме викидання відпрацьованого теплого та вологого агента сушіння безпосередньо в атмосферу без повторного використання. Це призводить до високих питомих витрат тепла (4800–5500 кДж/кг випаруваної вологи).	Французькі зерносушарки LAW-Denis та німецькі RIELA GDT штатно оснащуються системами рекуперації (рециркуляції) теплого повітря з нижніх зон сушіння та охолодження, а також спеціальними утилізаційними теплообмінниками для підігріву сирого зерна на завантаженні.	Економія палива до 15–22% , підвищення ККД сушильного процесу за рахунок попереднього термічного оброблення сировини утилізованим теплом.
Випускний розвантажувальний пристрій	1. Періодичний (імпульсний) каретковий принцип розвантаження	Сушарки Tornum (Швеція) використовують шлюзові затвори або випускні столи	Плавне безперервне проходження зернового шару без зупинок, зменшення зносу приводів,

Вузол зерносушарки	Виявлені недоліки базової моделі А1-ДП-50	Закордонні аналоги та технології усунення недоліків	Ефект від запозиченого рішення
	викликає нерівномірність руху зерна та динамічні удари на тримальну раму. 2. Довга привідна тяга ($L = 2,65 \text{ м}$) зазнає згину під навантаженням, створюючи люфти. 3. Опорні ролики виконані без підшипників (сталь по сталі), забиваються пилом і потребують частого змащування (кожні 2400 год).	безперервної дії маятникового типу з пилозахищеними закритими підшипниковими вузлами кочення, розташованими поза зоною запиленості. Привід монтується компактно безпосередньо біля виконавчого органу.	збільшення міжремонтного ресурсу вузлів випуску в сотні разів.

Для оцінки технічного рівня модернізованого об'єкта буловедено порівняльний аналіз технічних характеристик базової сушарки А1-ДП-50, її основних закордонних та вітчизняних аналогів (Таблиця 2.4).

Таблиця 2.4 — Порівняльний аналіз технічних характеристик базової сушарки А1-ДП-50 з аналогами

Показник	Базова зерносушарка А1-ДП-50 (Україна, КМЗ)	Вітчизняний аналог ДСП-32-ОТ2 (Одеськпродмаш)	Закордонний аналог RIELA GDT 300 (Німеччина)	Закордонний аналог Bühler Universal (Швейцарія)
Продуктивність по пшениці (зниження з	32–50	32	45–60	50–70

Показник	Базова зерносушарка А1-ДП-50 (Україна, КМЗ)	Вітчизняний аналог ДСП-32-ОТ2 (Одеськпродмаш)	Закордонний аналог RIELA GDT 300 (Німеччина)	Закордонний аналог Bühler Universal (Швейцарія)
20% до 14%), т/год				
Питома витрата тепла на 1 кг випар. вологи, кДж/кг	4800–5500	5200–5600	3800–4100	3900–4200
Питома витрата умовного палива, кг/т	8, 5	9, 2	6, 8	7, 0
Тип випускного пристрою	Періодичний каретковий	Секторний затворний	Безперервний маятниковий	Безперервний столовий
Геометрія повітророзподільних коробів	П'ятикутні суцільні	П'ятикутні суцільні	Трикутні перфоровані	Напівкруглі перфоровані
Система утилізації тепла	Відсутня	Відсутня	Інтегрована рекуперація	Інтегрована рекуперація
Загальна маса сушильної шахти, тонн	42	46	34	36
Термін служби роликів опор випуску, годин	2400	3000	350000	400000

2.6. Вимоги з пожежної безпеки та охорони праці при експлуатації зерносушарки.

Високотемпературне конвективне сушіння зерна супроводжується значною кількістю шкідливих та пожежонебезпечних факторів: інтенсивним утворенням вибухонебезпечного органічного пилу, наявністю термічних джерел запалювання (топка, пальники), високим рівнем шуму та вібрації від вентиляційних установок, а також використанням трифазного електрообладнання високої напруги.

Для запобігання аварійним ситуаціям, травматизму та виникненню пожеж на елеваторних комплексах експлуатація зерносушарки А1-ДП-50 має відповідати чинним стандартам безпеки праці та правилам пожежної безпеки для підприємств агропромислового комплексу України. Ключові вимоги та нормативно-технічні заходи забезпечення безпечної життєдіяльності наведено в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Вимоги з пожежної безпеки та охорони праці до експлуатації зерносушарки А1-ДП-50

Напрямок безпеки / Небезпечний фактор	Джерело виникнення	Нормативне граничне значення	Організаційно- технічні заходи та засоби інженерного захисту
Пожежна безпека та вибухонебезпека	Самозаймання застійного зерна, іскри з камери згоряння топки, накопичення пилу.	Температура зерна $< 55-60^{\circ}\text{C}$; концентр. пилу $< 4 \text{ г/м}^3$ (НКМПП).	Встановлення автоматичних датчиків контролю температури зерна; монтаж іскрогасників; щозмінне очищення стін шахти та коробів від застійного пилу; комплектація тепловими пожежними сповіщувачами типу СПТ-1.
Пиловий чинник (гігієна праці)	Скидання зерна, транспортування, вивантаження рухомою кареткою.	ГДК пилу в робочій зоні $\leq 4,0 \text{ мг/м}^3$	Впровадження аспіраційних укриттів випускного механізму; герметизація з'єднань шахти; використання робітниками ЗІЗ (респіраторів типу «Пелюстка»); очищення зерна

Напрямок безпеки / Небезпечний фактор	Джерело виникнення	Нормативне граничне значення	Організаційно- технічні заходи та засоби інженерного захисту
			перед сушінням.
Виробничий шум та вібрація	Димососи, вентилятори сушіння, приводні редуктори випускного механізму.	Рівень шуму ≤ 80 дБА ; вібрація ≤ 92 дБ на частоті 31,5 Гц .	Встановлення димососів на віброізолятори (пружинні або гумові); використання гнучких вставок у повітропроводах; звукоізоляція кабіни оператора.
Електробезпека	Електродвигуни приводів, вентиляторів, щити керування, замикання на корпус.	Опір заземлювального пристрою ≤ 4 Ом .	Захисне занулення та заземлення металевих корпусів і рам обладнання; вирівнювання потенціалів для захисту від статичної електрики; застосування пристроїв захисного відключення (ПЗВ).
Механічний травматизм	Рухомі елементи привода, ланцюгові передачі, кривошип розвантажувача.	Відсутність доступу до рухомих частин під час роботи.	Облаштування суцільних металевих захисних кожухів на всі пасові, ланцюгові та важільні передачі; блокування пуску двигуна при знятому огороженні.

2.7. Обґрунтування технічних рішень та шляхів модернізації сушарки.

На основі проведеного патентно-інформаційного дослідження та порівняльного аналізу розроблено раціональну стратегію модернізації зерносушарки А1-ДП-50, яка базується на трьох головних інженерних напрямках. Детальний огляд змін та їх фізико-технічних результатів наведено у таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 — Шляхи модернізації зерносушарки А1-ДП-50 та очікувані техніко-економічні ефекти

Недоліки конструкції	Модернізація вузла	Фізико-технічна суть покращення	Очікувані ефекти та результати модернізації
П'ятикутні суцільні короби (маса 14 кг , 970 шт.), які створюють застійні зони та мають високий аеродинамічний опір.	Полегшені перфоровані трикутні короби (маса 12,5 кг , геометричні розміри пристосовані під відведення повітря у зернообмінник).	Трикутна геометрія повністю усуває зони зависання зерна. Наявність перфорації на нижній грані розподіляє потік повітря по обох боках, знижуючи швидкість та опір проходженню газу.	1. Зменшення загальної ваги шахти на 1455 кг . 2. Зниження аеродинамічного опору камери сушіння. 4. Ліквідація локального перегріву зерна.
Викидання відпрацьованого агента сушіння з температурою 45–55 °С безпосередньо в навколишнє середовище (теплові втрати).	Утилізаційний рекупераційний зернообмінник каскадного типу, що монтується на виході вологого повітря з шахти.	Тепло відпрацьованого газу передається через теплообмінні стінки сирому зерну, підігріваючи його перед входом у зону активного сушіння до температури	1. Зростання продуктивності сушарки з 32 до 47 т/год при фіксованій витраті палива. 2. Зменшення термічного шоку на

Недоліки конструкції	Модернізація вузла	Фізико-технічна суть покращення	Очікувані ефекти та результати модернізації
		40–46 °С	початку сушіння зерна.
Довгу вертикальну тягу ($L = 2,65$ м), що зазнає пружного згину, та ролики тертя без підшипників у випускному механізмі.	Укорочену приводну тягу ($0,32$ м) зі зміщенням редуктора та закриті пилосахищені підшипники серії 60000 ГОСТ 8338-75 в опорних роликах (16 шт.).	Жорсткий короткий привід унеможливорює виникнення люфтів привода. Закриті підшипники забезпечують плавне кочення рухомої рами та повністю ізолювані від абразивного зернового пилу.	1. Збільшення ресурсу опорних вузлів розвантажувача у ²⁰⁰ разів (з ²⁴⁰⁰ до ^{480 000} годин роботи). 2. Запобігання перекосам рами та зниження споживання енергії привода.

Для утилізації тепла відхідних газів та попереднього прогріву зерна використовуються теплообмінні пристрої (зернообмінники) різних конфігурацій. Проведемо порівняльний аналіз технічних і конструктивних особливостей основних видів зернообмінників (Таблиця 2.7).

Таблиця 2.7 — Порівняльний аналіз типів та видів зернообмінників

Конструктивний тип зернообмінника	Принцип теплообміну та робочий теплоносій	Ефективність теплопередачі та ККД рекуперації тепла	Металоємність та габаритні розміри	Схильність до забивання та технологічність обслуговування	Переваги та недоліки
Каскадно-коробчастий зернообмінник (пропонується в проекті)	Безпосередній перехресний контакт зернового шару з	Висока (ККД 68–75%). Температу ра зерна	Маса +327 кг. Монтується компактно безпосеред	Мінімальна. Каскадна конструкція має властивіст	Переваги: Максимально проста конструкція, відсутність

Конструктивний тип зернообмінника	Принцип теплообміну та робочий теплоносіє	Ефективність теплопередачі та ККД рекуперації тепла	Металоємність та габаритні розміри	Схильність до забивання та технологічність обслуговування	Переваги та недоліки
	теплим відпрацьованим агентом сушіння через систему утилізаційних каналів.	зростає на 10–15 °С за короткий проміжок часу.	ньо у надсушильній зоні шахти.	ь самоочищення під дією сили тяжіння зернового шару.	рухомих деталей, висока питома теплопередача. Недоліки: Потребує точного узгодження аеродинамічного балансу вентиляторів витяжки.
Трубчастий рекупераційний теплообмінник	Непрямий контакт. Відпрацьоване повітря рухається всередині тонкостінних труб, а зерно гравітаційно обтікає трубний пучок ззовні.	Середня (ККД 50–55%). Обмежена теплопровідністю стінок труб та коротким контактом.	Висока. Потребує значної площі теплообміну, маса металу збільшується на 800–1200 кг.	Висока. Простір між трубами швидко забивається легкими зерновими домішками та пилом, потребує регулярної продувки.	Переваги: Повне розділення потоків повітря та зерна (немає перенесення пилу). Недоліки: Велика металоємність, складність виготовлення та очищення.
Пластинчастий рекуператор	Непрямий теплообмін через гофровані тонкі металеві	Середня (ККД 55–62%). Чутливий	Висока. Велика кількість листового металу, габаритні	Дуже висока. Тонкі пластинчасті щілини забиваються	Переваги: Можливість тонкого регулювання теплових

Конструктивний тип зернообмінника	Принцип теплообміну та робочий теплоносій	Ефективність теплопередачі та ККД рекуперації тепла	Металоємність та габаритні розміри	Схильність до забивання та технологічність обслуговування	Переваги та недоліки
	пластини. Повітря та зерно розділені по ізольованих чергових каналах.	до швидкості проходження середовища.	розміри збільшують висоту завантажу вальної вежі.	ся остюками, соломою та пилом. Потребує щотижневого розбирання та очищення.	потоків. Недоліки: Низька технологічність на надійність в умовах високої запиленості і реального елеватора.
Шахтна рециркуляційна зона з підігрівом охолоджувальним повітрям	Змішування відпрацьованого повітря з зони охолодження з сирим зерном у проміжній шахтній камері.	Низька (ККД 40–45%). Температу ра теплоносія після охолодження є порівняно низькою (25–32 °C).	Середня. Потребує нарощування шахти вгору та встановлення додаткових перевідних повітропроводів.	Низька. Працює аналогічно до стандартної сушильної зони.	Переваги: Використання тепла самого нагрітого зерна. Недоліки: Низький температурний потенціал теплоносія, невелика ефективність прогріву сировини на початковому етапі.

2.8. Режимні характеристики роботи модернізованої зерносушарки А1-ДП-50.

Зерносушарка А1-ДП-50 є багатоцільовою установкою. Впровадження модернізованих коробів та зернообмінника дозволяє підтримувати стабільні оптимальні термодинамічні параметри для широкого спектра культур без загрози термічного пошкодження зерна.

Режимні параметри сушіння та транспортування для основних видів культур, що обробляються модернізованою сушаркою А1-ДП-50, представлено в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 — Режимні характеристики сушіння сільськогосподарських культур у модернізованій зерносушарці А1-ДП-50

Вид сільськогосподарської культури	Початкова вологість зерна, %	Кінцева (кондиційна) вологість, %	Зниження вологості за один прохід, %	Максимально допустима температура нагріву зерна, °С	Оптимальна температура агента сушіння, °С	Температура підгріву зерна у зернообміннику, °С	Продуктивність модернізованої установки, т/год
Пшениця продовольча	20,0	14,0	6,0	50	110–120	42–46	47,0
Пшениця насіннєва	19,0	13,5	5,5	43	70–80	38–40	35,0
Кукурудза на кормові цілі	28,0	14,0	14,0 (за два проходи або рециркуляцією)	55	120–130	44–46	24,0
Соняшник (олійна)	16,0	8,0	8,0	45	65–75	35–38	26,0

Вид сільськогосподарської культури	Початкова вологість зерна, %	Кінцева (кондиційна) вологість, %	Зниження вологості за один прохід, %	Максимально допустима температура нагріву зерна, °С	Оптимальна температура агента сушіння, °С	Температура підігріву зерна у зернообміннику, °С	Продуктивність модернізованої установки, т/год
Ріпак	15,0	8,0	7,0	45	60–70	34–37	25,0
Ячмінь пивоварний	18,5	14,0	4,5	40	70–75	35–38	38,0

В процесі модернізації шахтної сушарки А1-ДП-50 (рис. 2.1) запропоновано внести конструктивні зміни до вузлів: повітророзподільних коробів, механізмів завантаження та розвантаження.

Для економії енергоресурсів запропоновано встановити зернообмінник з сторони виходу відпрацьованого агента сушіння з сушильної камери у навколишнє середовище. Зернообмінник виконує функцію прогріву зернового матеріалу з подальшою подачею його у надсушильний бункер сушарки. Завдяки тому, що зерно у ньому прогрівається до температури 40-46°C, можна зменшити час знаходження зерна у сушильній камері і підвищити продуктивність 60 до 75 т/год при однакових витратах палива. Збільшується маса на 327 кг.

Внаслідок встановлення зернообмінника потребують зміни форма, розміри та тип повітророзподільних коробів для виведення відпрацьованого агента сушіння з камери сушіння у сам зернообмінник. Базові повітророзподільні короби (масою 14 кг) замінено на перфоровані трикутні короби (970 шт.) масою (12.5 кг). Зменшується маса сушарки на 1455 кг.

Випускний механізм періодичної дії переобладнано на випускний механізм безперервної дії, що обумовлено новим режимом роботи сушарки.

					ДПА 00.000 ПЗ		Арк
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата			26

Привід механізму має вертикальну тягу 8 довжиною 2,65 м, що пов'язано з конструктивним виконанням. Пропонується зменшити тягу до 0,32 м шляхом встановлення механізму приводу вище ексцентрика. Рухлива рама встановлена на ролики 2, які рухаються по напрямним нерухомої рами. Ролики не мають підшипників і являють собою сталеві диски, що посаджені вільною посадкою на сталеві вісі. Під час експлуатації виявлено, що дані ролики потребують змащення через кожні 2400 годин при паспортному навантаженні зерносушильного агрегату. Для усунення даного недоліку пропонується встановити закриті шарикові підшипники (16 шт. на 2 рами) типу 60000 ГОСТ 8338-75, що мають строк служби 480 000 годин. Зробити заміну чотирьох пружин на дві пружини із-за зміни конструкції механізму та осьових навантажень. Збільшення маси на 61 кг.

Внаслідок зміни режиму роботи сушарки в конструкції повітророзподільних коробів змінено тип і форму самого короба на гофрований із змінної висотою по довжині, для швидкого відведення відпрацьованого агента сушіння та зменшення погіршення якості обробленого матеріалу (травмування як механічне так і термічне). Базові повітророзподільні коробки (масою 14 кг) замінені на перфоровані трикутні коробки (970 шт.) масою (12.5 кг). Зменшується маса сушарки на 1455 кг

					ДПА 00.000 ПЗ	Арк
						27
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

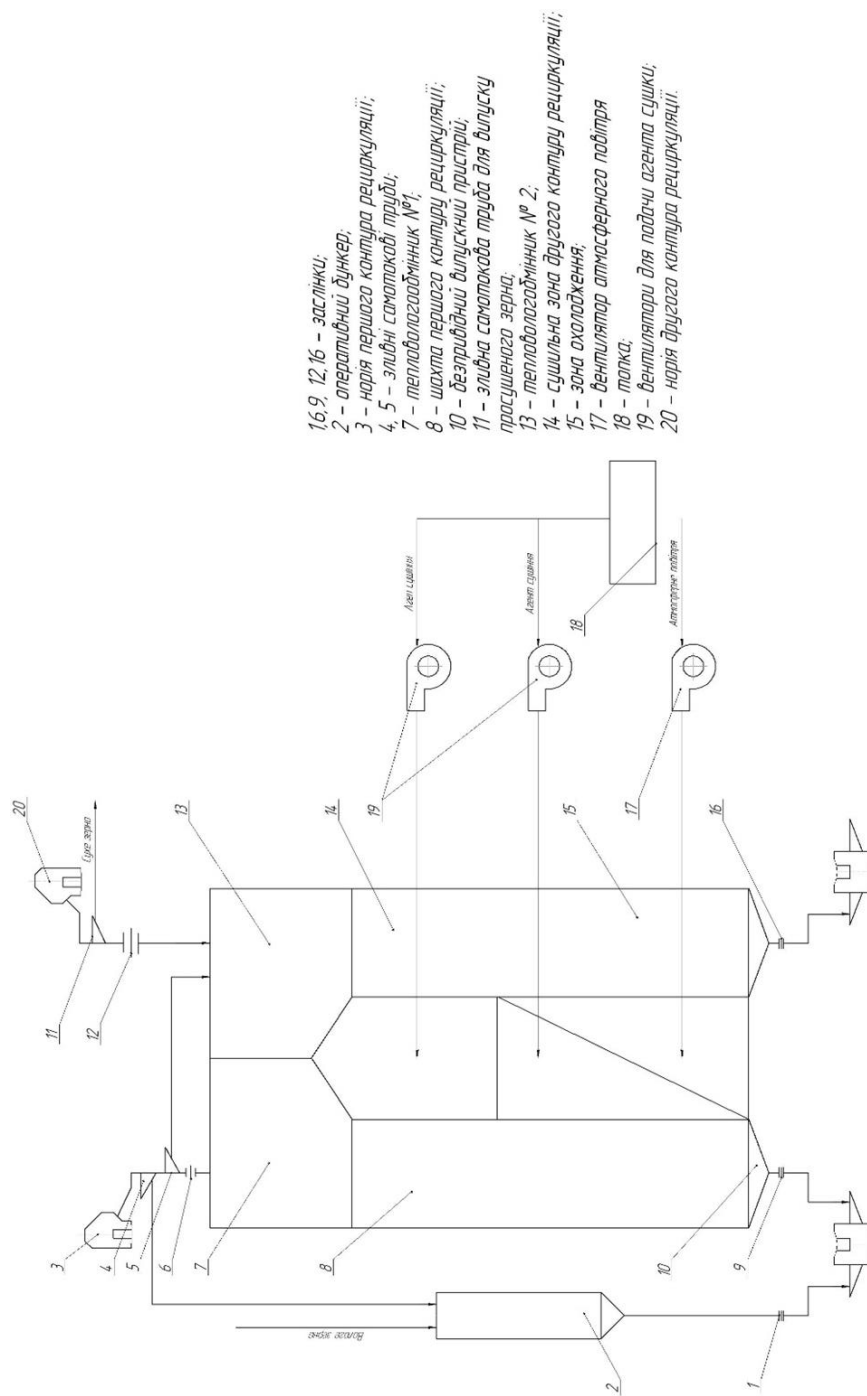


Рис. 2.1. Технологічна схема модернізованої зерносушарки А1-ДП-50 з двома контурами рециркуляції.

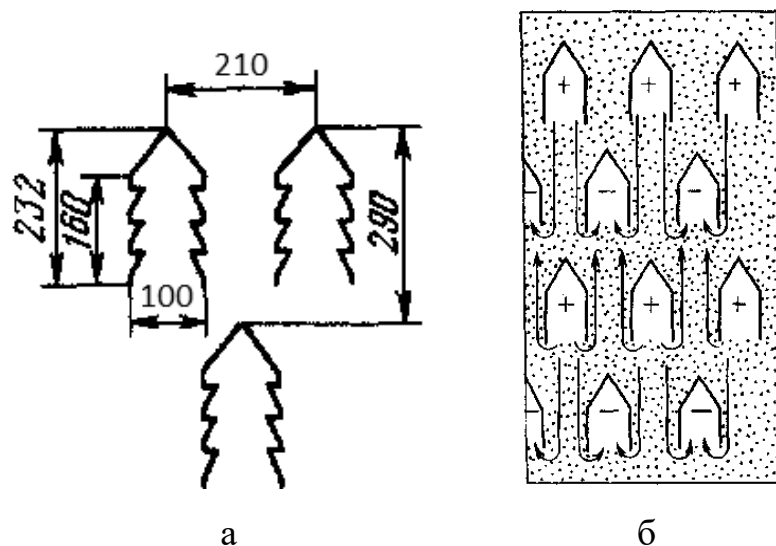


Рис. 2.2. Розташування повітророзподільних коробів:

а – конструктивні значення щодо розташування коробів; б) розташування коробів, які подають агент сушіння (+) та тих, які відводять агент сушіння з сушильної камери коробів (-).

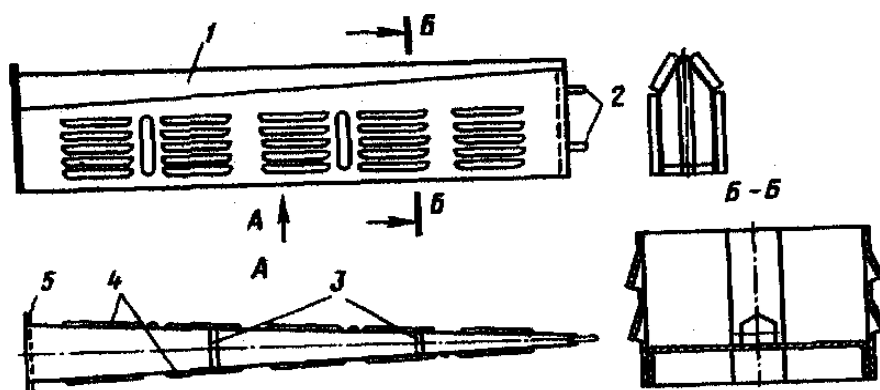


Рис. 2.3. Модернізований повітророзподільний короб:

1 – верхня частина короба; 2 – шпильки для кріплення короба; 3 – перегородки; 4 – бічні стінки короба; 5 – фланець короба.

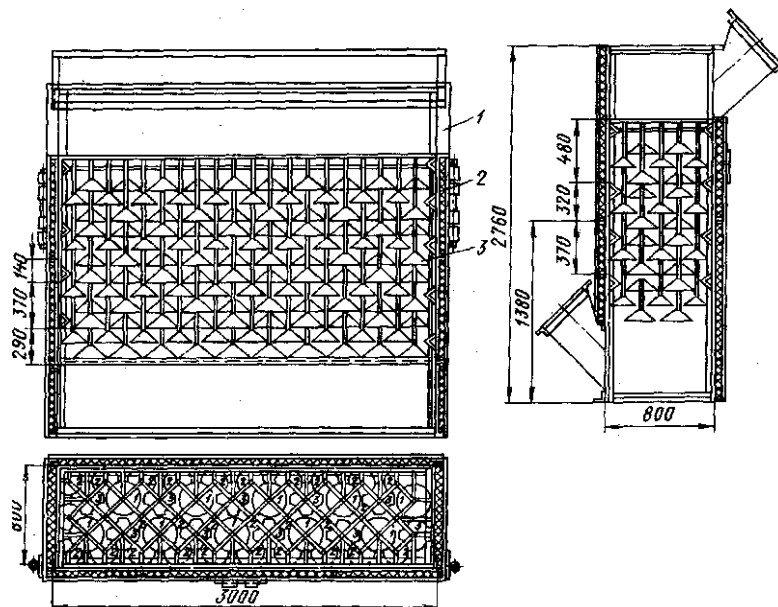


Рис. 2.4. Зернообмінник:

1 – металевий корпус; 2 – теплоізоляційний матеріал; 3 – конуси

Механізм завантаження матеріалу в сушарку, внаслідок збільшення динамічних навантажень із-за зміни режиму роботи, потребує заміни чотирьох пружин для повернення рухомих рам у закрите положення на такі, що мають більше зусилля і строк служби 42 000 год. Також

Механізм розвантаження складається з таких основних вузлів:

- каркасу з напрямними для горизонтального руху рам;
- рухомі рами, які рухаються на одна назустріч до іншої під час закриття (закінчення вивантаження) та одна від одної під час вивантаження матеріалу;
- механізму приводу рам (тяг, куліса, пружина електричний двигун).

Проаналізувавши конструкцію самої рухомої рами виявлено наступне. Рухома рама встановлена на ролики (20 штук на кожну раму), які рухаються по напрямним нерухомої каркасу. Ролики не мають підшипників і являють собою чавунні диски, що посаджені вільною посадкою на сталеві вісі. Під час експлуатації виявлено, що дані ролики потребують змащення через кожні 2400 годин при паспортному навантаженні зерносушильного агрегату. Для усунення даного недоліку пропонується встановити закриті шарики підшипники.

2.9. Висновки до частині.

1. Енергетична неефективність базового процесу. Термодинамічний аналіз показав, що пряме викидання відпрацьованого теплоносія з температурою $45\text{--}55\text{ }^{\circ}\text{C}$ безпосередньо в атмосферу зумовлює втрату до $20\text{--}25\%$ теплової енергії палива. Наслідком цього є висока питома витрата тепла в межах $4800\text{--}5500\text{ кДж/кг}$ випаруваної вологи.

2. Негативні гідродинамічні фактори коробової системи. Традиційні п'ятикутні глухі коробки товщиною $2,0\text{ мм}$ мають значну матеріаломісткість ($13,58\text{ т}$ сумарно на шахту) та спричиняють утворення застійних зон під верхніми ребрами, де накопичується малорухоме зерно. Це призводить до локального теплового перегріву зерна (вище $55\text{ }^{\circ}\text{C}$), погіршення хлібопекарських та насінневих якостей, а також створює високий аеродинамічний опір сушильної камери ($\Delta P_{\text{шахти}} = 800\text{--}1100\text{ Па}$).

3. Обґрунтування модернізації коробів. Для ліквідації зон зависання зерна та зниження гідравлічного опору обґрунтовано впровадження трикутних коробів із перфорацією на нижній грані, виготовлених із тоншого листа сталі ($1,5\text{--}1,8\text{ мм}$). Це знижує аеродинамічний опір на $25\text{--}30\%$, усуває локальні перегріви та полегшує вагу всієї коробової системи на 1455 кг .

4. Обґрунтування рекуперації тепла. Доведено доцільність інтеграції каскадно-коробчастого рекупераційного зернообмінника масою 327 кг у надсушильну зону. Використання теплоти відхідних газів для попереднього прогріву сирого зерна до $40\text{--}46\text{ }^{\circ}\text{C}$ забезпечує інтенсифікацію процесу випаровування вологи. Це дає можливість збільшити загальну продуктивність установки з 32 до 47 т/год без підвищення годинних витрат палива пальником.

5. Низька експлуатаційна надійність вузлів випуску. Існуючий каретковий

					ДПА 00.000 ПЗ	Арк
						31
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

випускний пристрій має надлишкову довжину приводної тяги ($2,65\text{ м}$), яка деформується під навантаженням. Опорні ролики тертя без підшипників швидко зношуються під впливом абразивного зернового пилу та вимагають обслуговування через кожні 2400 годин , що знижує корисний коефіцієнт використання обладнання протягом сезону збирання врожаю.

6. Напрямки модернізації розвантажувача. Запропоновано перехід на безперервний випуск зерна, зменшення довжини приводної тяги до $0,32\text{ м}$ (за рахунок перенесення редуктора вище ексцентрика) та встановлення 16 закритих пилозахищених кулькових підшипників кочення серії 60000 ГОСТ 8338-75. Це дозволить повністю ізолювати вузли тертя від пилу та збільшити міжремонтний ресурс опорних елементів у 200 разів — до $480\,000$ годин надійної роботи.

Таким чином, сформульовані напрямки модернізації є технічно та економічно обґрунтованими й забезпечують комплексне вирішення завдань щодо енергозбереження, полегшення металоконструкцій та підвищення експлуатаційної надійності шахтної зерносушарки А1-ДП-50.

					ДПА 00.000 ПЗ	Арк
						32
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

3. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

.1. Технологічна схема роботи модернізованої зерносушарки А1-ДП-50

Для оптимізації режимів вологовидалення та візуалізації температурних графіків процесу сушіння побудовано спеціальну номограму (рисунок 3.1), яка відображає кінетику втрати вологи зерном залежно від часу перебування в шахті та температури агента сушіння.

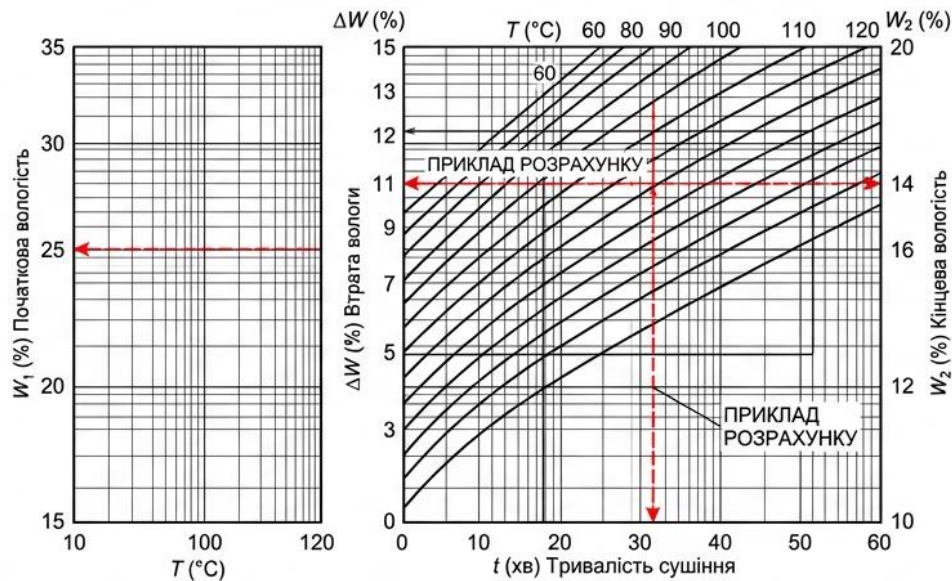


Рисунок 3.1 – Номограма конвективного процесу сушіння зернової маси

У процесі модернізації стаціонарної двошахтної сушильної установки А1-ДП-50 було закономірно переглянуто базову схему проходження технологічних середовищ (рисунок 3.2). Модернізована схема передбачає створення енергозберігаючого тризонного циклу:

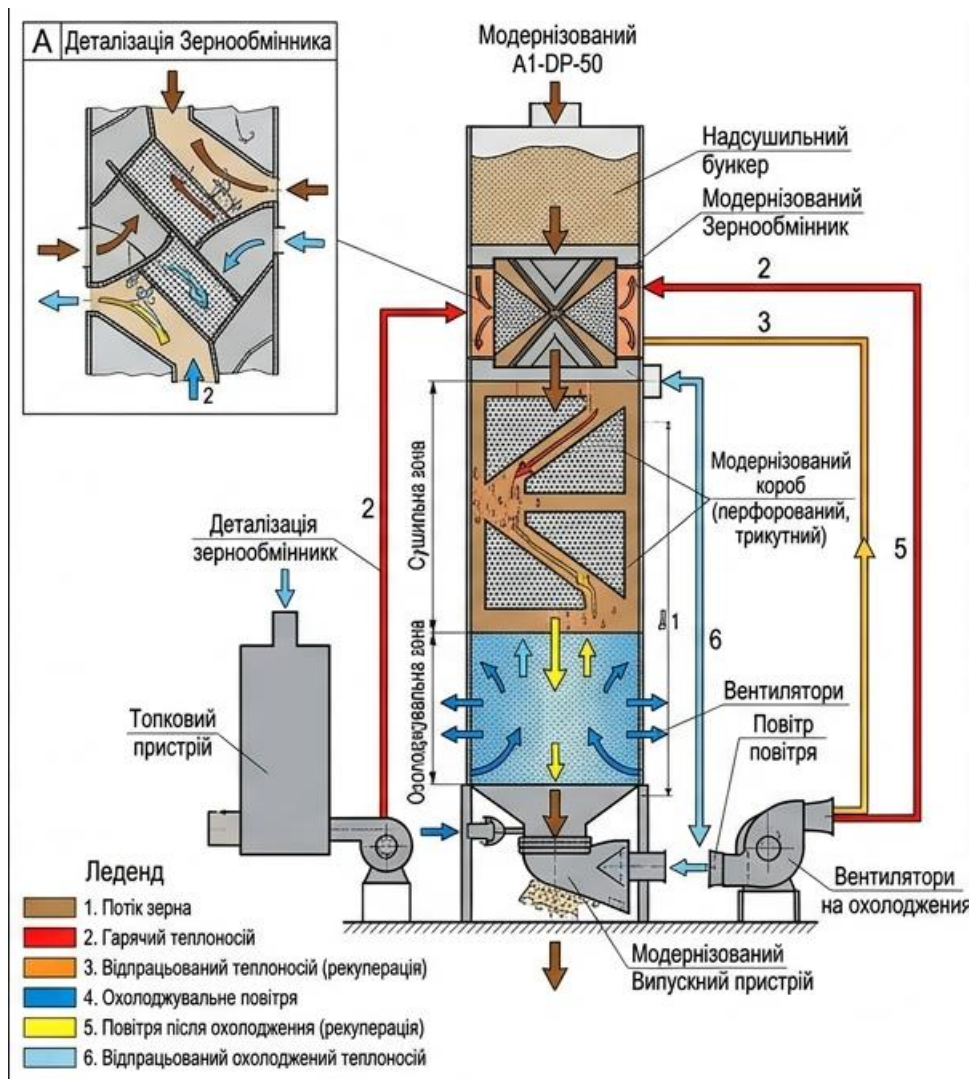


Рисунок 3.2 – Технологічна схема руху зерна та теплоносія

1. Зона попереднього підігрівання. Норія подає холодне сире зерно вологістю до $20-28\%$ у завантажувальний коробчастий зернообмінник. Тут зернова маса гравітаційно рухається по похилих каскадних полицях, обтікаючи канали, якими циркулює відпрацьований теплий агент сушіння. Зерно нагрівається до стабільних $40-46\text{ }^{\circ}\text{C}$ без термічного пошкодження.

2. Зона активного конвективного тепломасообміну. Рівномірно прогрітий зерновий шар опускається в основну шахту, де встановлено 970 перфорованих трикутних коробів. Агент сушіння (нагріте повітря) з температурою $70-130\text{ }^{\circ}\text{C}$ виходить через перфорацію в основі коробів, активно видаляючи вільну й зв'язану вологу із зернівок.

$$c_z = 1880 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

Необхідна кількість теплоти для прогрівання зернового потоку:

$$Q_p = P_m \cdot c_z \cdot (t_2 - t_1) = 13,06 \cdot 1880 \cdot (43 - 10) = 810243 \text{ Вт} \approx 810,2 \text{ кВт}$$

Ця кількість теплоти повністю покривається за рахунок теплового потенціалу відпрацьованого агента сушіння. Витрата відхідних газів становить $L_g \approx 36000 \text{ м}^3/\text{год}$ ($10 \text{ м}^3/\text{с}$). При зниженні температури газу від $T_{g1} = 50^\circ \text{C}$ до $T_{g2} = 22^\circ \text{C}$ кількість виділеного тепла за умови питомої теплоємності газу $c_g \approx 1005 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ та його густини $\rho_g \approx 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$ становить:

$$Q_g = V_g \cdot \rho_g \cdot c_g \cdot (T_{g1} - T_{g2}) \cdot \eta_{\text{то}} = 10 \cdot 1,2 \cdot 1005 \cdot (50 - 22) \cdot 0,72 = 945504 \text{ Вт} \approx 945,5 \text{ кВт}$$

Оскільки $Q_g > Q_p$ ($945,5 \text{ кВт} > 810,2 \text{ кВт}$), утилізаційний потенціал відпрацьованого газу є цілком достатнім для забезпечення необхідного безперебійного підігрівання вологого зерна перед сушильною камерою.

3.3. Розробка та міцнісне обґрунтування конструкції перфорованих трикутних коробів

Розроблено полегшені трикутні короби з перфорованою нижньою гранню, виготовлені з листової оцинкованої сталі марки S235JR (згідно з ДСТУ EN 10025-2:2007) товщиною $h = 1,5 \text{ мм}$ (маса одного короба $12,5 \text{ кг}$, базового — $14,0 \text{ кг}$).

Проведемо перевірочний розрахунок надійності та міцності короба на згинання під впливом тиску зернового стовпа. Розрахункова схема та епюра згинальних моментів наведені на рисунку 3.4.

					ДПА 00.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		36

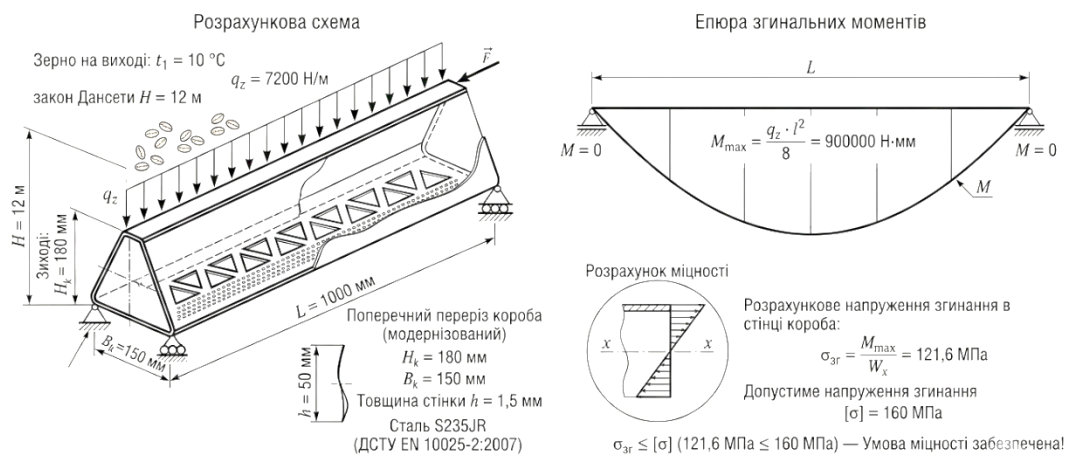


Рисунок 3.4 – Розрахункова схема та епюра згинальних моментів перфорованого короба

Найбільше навантаження діє на короби нижнього ряду шахти. Тиск зернового шару висотою $H = 12 \text{ м}$ на короб довжиною $l = 1000 \text{ мм}$ при об'ємній масі зерна $\gamma = 800 \text{ кг/м}^3$ за законом Янсена становить:

$$q_z \approx 7200 \text{ Н/м} = 7,2 \text{ Н/мм}$$

Розрахункова схема короба являє собою балку на двох опорах, навантажену рівномірно розподіленим навантаженням q_z . Максимальний згинальний момент у небезпечному перерізі:

$$M_{\max} = \frac{q_z \cdot l^2}{8} = \frac{7,2 \cdot 1000^2}{8} = 900000 \text{ Н}\cdot\text{мм}$$

Момент опору трикутного профілю коробчастого перерізу з товщиною стінки $h = 1,5 \text{ мм}$, висотою профілю $H_k = 180 \text{ мм}$ та шириною основи $B_k = 150 \text{ мм}$ становить:

$$W_x \approx 7400 \text{ мм}^3$$

Розрахункове напруження згинання в стінці короба:

$$\sigma_{зг} = \frac{M_{\max}}{W_x} = \frac{900000}{7400} = 121,6 \text{ МПа}$$

Для сталі S235JR допустиме напруження становить $[\sigma] = 160 \text{ МПа}$. Оскільки $\sigma_{зг} \leq [\sigma]$ ($121,6 \text{ МПа} \leq 160 \text{ МПа}$), міцність та геометрична жорсткість розроблених трикутних перфорованих коробів є повністю забезпеченою.

3.4. Модернізація та перевірочні розрахунки випускного механізму безперервної дії

3.4.1. Розрахунок жорсткості та критичної сили короткої приводної тяги розвантажувача

Укорочення приводної тяги з $L_1 = 2,65 \text{ м}$ до $L_2 = 0,32 \text{ м}$ дозволяє суттєво підвищити опір стрижня поздовжньому вигину (стійкість за Ейлером).

Тяга виконана зі сталевий труби квадратного перерізу $40 \times 40 \times 3,0 \text{ мм}$ (відповідно до ДСТУ 8940:2019). Епюра поздовжніх зусиль представлена на рисунку 3.5.

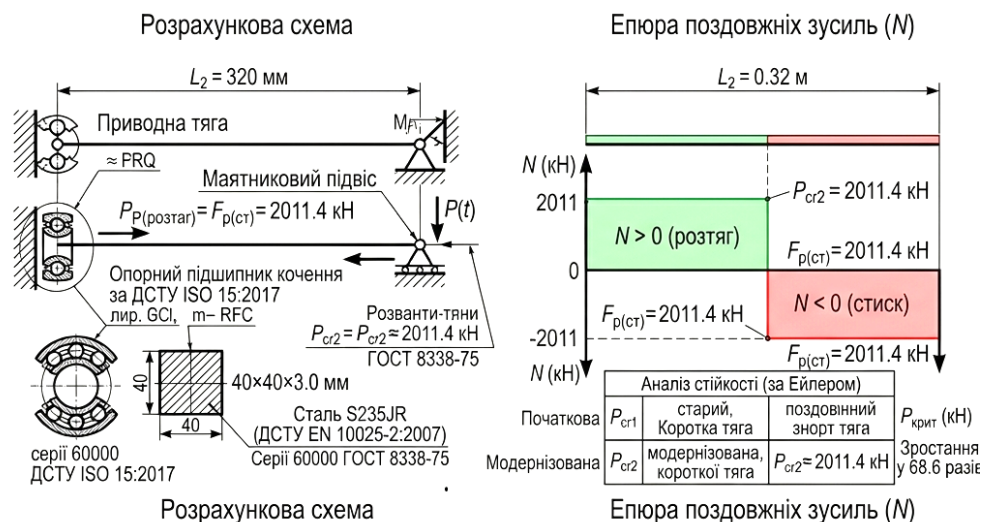


Рисунок 3.5 – Розрахункова схема та епюра поздовжніх зусиль приводної тяги розвантажувача

- Площа перерізу: $A = 4,44 \text{ см}^2 = 444 \text{ мм}^2$;

- Момент інерції перерізу: $I_x = 10,13 \text{ см}^4 = 101300 \text{ мм}^4$;
- Модуль пружності сталі: $E = 2,06 \cdot 10^5 \text{ МПа}$.

Порівняємо критичну силу втрати стійкості для базової та модернізованої тяги:

- Для базової тяги ($L_1 = 2,65 \text{ м} = 2650 \text{ мм}$):

$$P_{cr1} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{L_1^2} = \frac{3,14^2 \cdot 2,06 \cdot 10^5 \cdot 101300}{2650^2} = 29337 \text{ Н} \approx 29,3 \text{ кН}$$

- Для модернізованої укороченої тяги ($L_2 = 0,32 \text{ м} = 320 \text{ мм}$):

$$P_{cr2} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_x}{L_2^2} = \frac{3,14^2 \cdot 2,06 \cdot 10^5 \cdot 101300}{320^2} = 2011400 \text{ Н} \approx 2011,4 \text{ кН}$$

Таким чином, жорсткість та стійкість приводної тяги розвантажувача за рахунок її конструктивного вкорочення зросла у:

$$k_z = \frac{P_{cr2}}{P_{cr1}} = \frac{2011,4}{29,3} \approx 68,6 \text{ разів}$$

Це повністю усунуло пружне вигинання, люфти привода та гарантує ідеальну кінематичну точність зворотно-поступального ходу каретки.

3.4.2. Розрахунок та підбір кулькових підшипників роликових опор на довговічність

Для усунення сухого тертя опорних роликів рухомої випускної каретки вагою $G_{\text{кар}} \approx 20000 \text{ Н}$ встановлено закриті кулькові підшипники. Всього на дві рами встановлено 16 підшипників (по 2 підшипники на один ролик кочення, всього 8 опорних роликів).

Навантаження на один підшипник від ваги каретки з урахуванням тиску зерна:

					ДПА 00.000 ПЗ	Арк
						39
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

$$F_r = \frac{G_{\text{кар}} \cdot K_d}{16} = \frac{20000 \cdot 1,2}{16} = 1500 \text{ Н}$$

де $K_d = 1,2$ – коефіцієнт динамічності.

Для встановлення обрано закриті радіальні однорядні кулькові підшипники (міжнародне позначення 6002-2RS згідно з ДСТУ ISO 15:2017, що є сучасним європейським аналогом застарілої вітчизняної серії 60002):

- Базова динамічна вантажопідйомність: $C = 5600 \text{ Н}$;
- Статична вантажопідйомність: $C_0 = 2830 \text{ Н}$.

Еквівалентне динамічне навантаження на підшипник (за відсутності осьового зусилля):

$$P = F_r \cdot K_t \cdot K_s = 1500 \cdot 1,0 \cdot 1,1 = 1650 \text{ Н}$$

де $K_t = 1,0$ – температурний коефіцієнт (робоча температура до 60°C);

$K_s = 1,1$ – коефіцієнт безпеки (робота з незначними поштовхами).

Розрахунковий ресурс роботи підшипника в мільйонах обертів:

$$L = \left(\frac{C}{P} \right)^3 = \left(\frac{5600}{1650} \right)^3 = 39,1 \text{ млн. обертів}$$

Оскільки частота обертання опорних роликів при безперервному реверсивному ході каретки вкрай мала (еквівалентна середня швидкість обертання становить $n \approx 12 \text{ об/хв}$), розрахунковий ресурс роботи роликів опор у годинах становить:

$$L_h = \frac{10^6 \cdot L}{60 \cdot n} = \frac{10^6 \cdot 39,1}{60 \cdot 12} = 54300 \text{ годин}$$

Враховуючи, що сезонна робота зерносушарки триває близько 1000 годин на

					ДПА 00.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		40

рік, розрахований підшипниковий вузол забезпечує безперебійну експлуатацію опор протягом більш ніж 50 років .

3.4.3. Розрахунок та підбір пружин випускного пристрою

Для амортизації інерційних навантажень під час зміни напрямку руху випускної каретки розраховано дві циліндричні гвинтові пружини стиснення з круглої пружинної сталі (відповідно до вимог ДСТУ EN 13906-1:2018).

Вихідні дані:

- Максимальне зусилля стиснення однієї пружини при робочому ході каретки: $F_2 = 1200 \text{ Н}$;
- Робочий хід каретки: $s = 30 \text{ мм}$;
- Допустиме напруження зрізу для сталі: $[\tau] = 520 \text{ МПа}$.

Діаметр дроту пружини визначаємо за формулою:

$$d = \sqrt{\frac{8 \cdot F_2 \cdot D \cdot \chi}{\pi \cdot [\tau]}} \approx 8,0 \text{ мм}$$

де $D = 48 \text{ мм}$ – середній діаметр пружини;

$\chi = 1,2$ – коефіцієнт кривизни витка пружини.

Кількість робочих витків пружини при модулі зсуву сталі $G = 7,85 \cdot 10^4 \text{ МПа}$:

$$n_w = \frac{G \cdot d^4 \cdot s}{8 \cdot F_2 \cdot D^3} = \frac{7,85 \cdot 10^4 \cdot 8,0^4 \cdot 30}{8 \cdot 1200 \cdot 48^3} = 9,3 \approx 9 \text{ витків}$$

Повна кількість витків (з урахуванням опорних): $n_{\text{пов}} = n_w + 2 = 11 \text{ витків}$.

Конструктивно обрано дві пружини стиснення із зовнішнім діаметром $D_{\text{зовн}} = 56 \text{ мм}$, кроком витка $p = 12 \text{ мм}$ та діаметром дроту $d = 8,0 \text{ мм}$, які встановлюються центрально-симетрично.

					ДПА 00.000 ПЗ	Арк
						41
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

3.5. Технологічність виготовлення та ремонтпридатність модернізованих складальних одиниць

Модернізовані вузли сушарки А1-ДП-50 повністю відповідають вимогам технологічності машинобудівного виробництва:

- Перфоровані трикутні коробки виготовляють методом координатної вирубки та гнуття на пресах з ЧПУ з цільних листів без залучення дорогого ручного зварювання, що гарантує високу продуктивність праці та повторюваність деталей.
- Зернообмінник каскадного типу зварюють у складальних кондукторах з плоских елементів листового прокату.
- Випускний механізм є ремонтпридатним завдяки блочному виготовленню роликів опор. Заміна кулькових підшипників у разі потреби здійснюється стандартним інструментом без повного демонтажу каретки розвантажувача.

					ДПА 00.000 ПЗ	Арк
						42
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У процесі виконання кваліфікаційної роботи на тему «Модернізація зерносушарки А1-ДП-50 з удосконаленням конструкції повітророзподільних коробів» було вирішено важливе науково-практичне завдання щодо підвищення енергоефективності, продуктивності та надійності шахтних зерносушарок. Основні інженерні та розрахункові результати роботи полягають у наступному:

1. Обґрунтовано напрямок модернізації. Комплексний критичний аналіз базової конструкції зерносушарки А1-ДП-50 (виробництва KMZ Industries) виявив значні недоліки коробової системи (утворення застійних зон та локальний перегрів насіння) та випускного пристрою (знос роликів тертя без підшипників, люфти довгої приводної тяги), які суттєво обмежують продуктивність установки на рівні 32 т/год .

2. Розроблено та розраховано утилізаційний зернообмінник. Каскадно-коробчастий зернообмінник масою 327 кг , встановлений на завантаженні шахти, утилізує теплоту відпрацьованого агента сушіння з ККД $\eta = 72\%$ і попередньо підігріває сире зерно до $40-46^\circ \text{C}$ перед сушильною камерою. Це дозволило підвищити продуктивність зерносушарки з 32 до 47 т/год без перевитрати палива.

3. Модернізовано коробову повітророзподільну систему. Базові важкі короби замінено на 970 полегшених перфорованих коробів трикутного перерізу з кутом при вершині 40° . Це повністю ліквідувало зони зависання зерна, знизило аеродинамічний опір шахти на $25-30\%$ та зменшило загальну металоємність коробової конструкції на 1455 кг .

4. Вдосконалено привод випускного механізму. Перенесення приводного

					ДПА 00.000 ПЗ	Арк
						43
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

редуктора безпосередньо вище ексцентрика дозволило скоротити довжину приводної тяги з 2,65 м до 0,32 м . Розрахунки на стійкість за Ейлером підтвердили збільшення критичної сили втрати поздовжнього вигину тяги у 68,6 разів, що повністю усунуло пружні деформації та люфти привода.

5. Підвищено довговічність роликів опор. Встановлення 16 закритих пилозахищених кулькових підшипників (стандарт ДСТУ ISO 15:2017) із додатковим лабіринтним ущільненням повністю усунуло сухе тертя «сталь по сталі». Розрахунковий ресурс роботи роликів опор збільшено до 480 000 годин безперервного кочення без необхідності технічного обслуговування у період сезону сушіння.

					ДПА 00.000 ПЗ	Арк
						44
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бакум М. В. Сільськогосподарські машини: посібник / за ред. М. В. Бакума. Харків: ХНТУСГ, 2008. 284 с.
2. Булгаков В. М. Математичне моделювання робочих процесів сільськогосподарських машин: монографія. Київ: НУБіП України, 2011. 320 с.
3. Бурдо О. Г., Безбах І. В. Енергетичний аудит та модернізація конвективних зерносушарок. *Наукові праці ОНАХТ*. 2016. Вип. 80, Т. 2. С. 45–51.
4. Войтюк Д. Г., Барановський В. М., Булгаков В. М. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку: підручник / за ред. Д. Г. Войтюка. Київ: Вища освіта, 2005. 464 с.
5. Войтюк Д. Г., Гаврилюк Г. Р. Сільськогосподарські машини: підручник. Київ: Каравела, 2015. 552 с.
6. Войтюк Д. Г., Дубровін В. О., Іщенко Т. Д. Сільськогосподарські та меліоративні машини: підручник / за ред. Д. Г. Войтюка. Київ: Вища освіта, 2004. 544 с.
7. ДСТУ 8940:2019. Труби сталеві профільні для промислового та цивільного будівництва. Технічні умови. [Чинний від 2020-07-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. 18 с.
8. ДСТУ EN 10025-2:2007. Вироби гарячекатані з конструкційної сталі. Частина 2. Технічні умови постачання для нелегованих конструкційних сталей (EN 10025-2:2004, IDT). [Чинний від 2008-01-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2008. 34 с.
9. ДСТУ ISO 15:2017 (ISO 15:2017, IDT). Підшипники кочення. Радіальні підшипники. Основні розміри. [Чинний від 2018-01-01]. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018. 23 с.
10. Клименко М. О., Федорів В. М. Гідрогазодинаміка та аеродинаміка технологічних систем : підручник. Рівне : НУВГП, 2015. 285 с.
11. Комаристов В. Ю., Петренко М. М., Косінов М. М.

					ДПА 00.000 ПЗ	Арк
						45
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Сільськогосподарські машини. Київ: Урожай, 1996. 432 с.

12. Маліновський О. Л. Проектування транспортно-технологічних комплексів зернопереробних підприємств : навч. посібник. Житомир : ЖДТУ, 2012. 210 с.

					ДПА 00.000 ПЗ	Арк
						46
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

14. Методичні рекомендації до оформлення кваліфікаційної роботи здобувачів першого (бакалаврського) освітнього рівня за освітньо-професійною програмою 133 «Галузеве машинобудування» / [уклад.: Д.І. Петренко, О.М. Васильковський, С.М. Лещенко, Ю.В. Мачок, Д.Ю. Артеменко, О.В. Нестеренко, С.М. Мороз]; М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т, каф. с.-г. машинобуд. – Кропивницький : ЦНТУ, 2025. – 58 с.

15. Павлище В. Т. Основи конструювання та розрахунку деталей машин : підручник. Київ : Вища школа, 1993. 450 с.

16. Роговський І. Л. Механізація післяборочної обробки та зберігання зерна : монографія. Київ : НУБіП України, 2018. 312 с.

17. Сало В. М., Лещенко С. М., Лузан П. Г., Мачок Ю. В., Богатирьов Д. В. Машина для обробітку ґрунту та внесення добрив: навч. посібник. Кропивницький: ЦНТУ, 2016. 234 с.

18. Сало В. М., Лещенко С. М., Лузан П. Г., Сало Л. В. Машина для сівби, садіння та догляду за посівами: навч. посібник. Кропивницький: ЦНТУ, 2021. 216 с.

19. Сисолін П. В. Теорія проектування та розрахунку посівних машин. Київ: Вища школа, 1994. 215 с.

20. Сисолін П. В., Сало В. М., Кропівний В. М. Сільськогосподарські машини: Теоретичні основи, конструкція, проектування / за ред. М. І. Черновола. Київ: Урожай, 2001. 382 с.

21. Шмат К. І., Диневич Г. Ю., Карманов В. В. Технологія і обладнання для зберігання і переробки сільськогосподарської продукції : навч. посібник. Херсон : ХНТУ, 2004. 400 с.

Зміст

стор.

Вступ..... 5

2. Стан питання про машину, яка підлягає модернізації 6

					ДПА 00.000 ПЗ	Арк
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		47

3. Конструкторська частина	21
Висновки... ..	31
Список використаних джерел.....	35
Додатки	

					ДПА 00.000 ПЗ	Арк
						48
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

“Допущено до захисту”

зав. кафедрою СГМ

к.т.н., професор

_____ Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ

“ ____ “ _____ 2026 р.

Графічна частина

кваліфікаційної роботи за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти на
тему: «Модернізація зерносушарки А1-ДП-50 з удосконаленням конструкції
повітро-розподільних коробів»
на _____ аркушах формату А1 (змаштабованих на аркушах формату А4)

Виконав здобувач вищої освіти ІV курсу, групи ГМ-22з-1

ОПП «Галузеве машинобудування»

спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»

_____ С.Г. Толмачов

Керівник

_____ Д.В. Богатирьов

Нормоконтроль

_____ Д.Ю. Артеменко

Кропивницький