

Центральноукраїнський національний технічний університет
Агротехнічний факультет
Кафедра сільськогосподарського машинобудування

“Допущено до захисту”

зав. кафедрою СГМ

к.т.н., професор

_____Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ

“ ____ ” ____ червня ____ 2026 р.

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

Механізація переробки пшениці з удосконаленням
зерносушарки RIELA GDT 300

Виконав здобувач вищої освіти IV курсу,
групи AI-22-1

ОПП «Агроінженерія»

спеціальності 208 «Агроінженерія»

_____Скорик Микола Сергійович

« ____ » ____ червня ____ 2026 р.

Керівник проекту

доц., канд. техн. наук

_____Ірина СИСОЛІНА

« ____ » ____ червня ____ 2026 р.

Рецензент

ст. викл., канд. техн. наук

_____Олександр ЛІВІЦЬКИЙ

« ____ » ____ червня ____ 2026 р.

Кропивницький

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет АТФ

Кафедра сільськогосподарського машинобудування

Рівень вищої освіти бакалавр

Галузь знань 20 Аграрні науки та продовольство

Спеціальність 208 Агроінженерія

Освітньо-професійна програма «Агроінженерія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ

«__» _____ 2026 року

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

Скорик Микола Сергійович

1. Тема роботи: **«Механізація переробки пшениці з удосконаленням зерносушарки RIELA GDT 300»**
2. Керівник роботи Сисоліна І.П., к.т.н., доцент
3. Строк подання студентом роботи до захисту 05.06.2026
4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи (проекту)
модернізація зерносушарки, яка в цілому направлена на підвищення продуктивності і якості процесу сушіння агрокультур.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1-6	Сисоліна І.П., доцент, к.т.н.		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз типової технології вирощування культури з визначенням шляхів її удосконалення	25.05.26	
2	Операційна технологія виконання заданої операції з вирощування заданої культури	30.05.26	
3.	Інженерна частина	01.06.26	
4.	Охорона праці	01.06.26	
5.	Виконання графічної частини	05.06.26	
6.	Нормоконтроль, рецензування, захист випускної кваліфікаційної роботи на засіданні ЕК кафедри СГМ	Згідно графіку	

Дата видачі завдання

«___» _____ 2026 р.

Підпис керівника _____

Сисоліна І.П.

(прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання

«___» _____ 2026 р.

Підпис здобувача _____

Скорик М.С.

(прізвище та ініціали)

Формат	Зона	Позиція	Позначення	Найменування	Кількість	Примітки
				<u>Документація загальна</u>		
				<i>Заново розроблена</i>		
A4			СА 00.000 ПЗ	Пояснювальна записка	1	
				<u>Документація по технологічній</u>		
				<u>частині</u>		
				<i>Заново розроблена</i>		
A1			СА 00.001 ТЧ	Технологічна карта	1	
A1			СА 00.002 ТЧ	Операційна карта	1	
				<u>Документація по конструкторській</u>		
				<u>частині</u>		
				<i>Заново розроблена</i>		
A1			СА 00.000 С2	Зерносушарка		
				Технологічна схема	1	
A1			СА 09.000 СБ	Механізм розвантаження		
				Складальне креслення	1	
A2			СА 00.030.070 СБ	Муфта відцентрова		
				Складальне креслення	1	
A2			СА 22.071 С2	Зернообмінник		
				Функціональна схема	1	
				СА 00.000 ВП		
Зм.	Аркуш	№ док.	Підпис	Дата	Відомість кваліфікаційної роботи	
Розроб.	Скорик					
Перевір.	Сисоліна					
Н. контр.	Артеменко					
Затв.	Васильковський				Літера	
					Аркуш	Аркушів
					3	1
					ЦНТУ, гр. АІ-23мб-1.2	

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота присвячена підвищенню енергоефективності процесу післязбиральної обробки продовольчої пшениці за рахунок модернізації шахтної зерносушарки RIELA GDT 300. У роботі інженерно обґрунтовано та розроблено технологічний вузол рекуперації тепла у вигляді каскадного міжшахтного зернообмінника. Впроваджене конструктивне рішення забезпечує ощадний попередній підігрів зернової маси відпрацьованим агентом сушіння, що повністю нівелює ризик виникнення термічного шоку матеріалу. Для підвищення експлуатаційної надійності лінії прямооточну схему переведено в рециркуляційний режим та модернізовано випускний пристрій сушарки. Нова конструкція базується на використанні вдосконаленого ексцентрикового механізму розвантаження з можливістю частотного регулювання швидкості сходу збіжжя. Проведені технологічні, кінематичні та міцнісні розрахунки підтвердили стабільність роботи приводу та високу економічну доцільність запропонованих змін. У розділі охорони праці сформувано комплекс сучасних технічних заходів для забезпечення повної вибухопожежобезпеки та електробезпеки оновленого сушильного комплексу.

Ключові слова: зерносушарка, зернообмінник, рециркуляція, механізм розвантаження, енергоефективність.

ABSTRACT

The qualification thesis is dedicated to improving the energy efficiency of the post-harvest processing of milling wheat by modernizing the RIELA GDT 300 shaft grain dryer. The study provides engineering justification and development for a heat recovery technological unit designed as a cascade inter-shaft grain heat exchanger. The implemented structural solution ensures gentle preheating of the grain mass using the exhausted drying agent, which completely eliminates the risk of thermal shock to the material. To enhance the operational reliability of the line, the straight-flow scheme was converted to a recirculation mode, and the discharge device of the dryer was modernized. The new design is based on the use of an advanced eccentric discharge mechanism with the capability of frequency regulation of the grain flow rate. Conducted technological, kinematic, and strength calculations confirmed the stability of the drive operation and the high economic feasibility of the proposed modifications. In the occupational health and safety section, a complex of modern technical measures was formulated to ensure complete explosion, fire, and electrical safety of the updated drying complex.

Keywords: grain dryer, grain heat exchanger, recirculation, discharge mechanism, energy efficiency.

ВСТУП

Актуальність теми. Забезпечення сталого функціонування агропромислового комплексу є стратегічним завданням для економічної стабільності та продовольчої безпеки України. Вирощування та подальша переробка зернових культур, зокрема пшениці, традиційно займають провідне місце у структурі вітчизняного сільськогосподарського виробництва. Однак сьогодення ставить перед галуззю безпрецедентні виклики, зумовлені геополітичними факторами та руйнівними наслідками військових дій.

Сучасний етап розвитку українського агросектору проходить в умовах повномасштабної війни, яка завдала катастрофічних збитків виробничій інфраструктурі. Значна частина елеваторних потужностей, зерносковищ та переробних підприємств у східних, південних та центральних регіонах країни зазнала суттєвих пошкоджень або була повністю знищена внаслідок обстрілів. Крім безпосередньої руйнації матеріально-технічної бази, підприємства галузі змушені працювати в умовах глибокої енергетичної кризи, постійного дефіциту рідкого палива та нестабільного електропостачання. За таких обставин питання первинної обробки та збереження зібраного врожаю набуває критичного значення, оскільки втрата кожної тонни зерна безпосередньо впливає на стійкість держави.

Значення українського зерна вже давно вийшло за межі локального ринку, перетворившись на вагомий важіль глобальної геополітики. Україна виступає одним із ключових гарантів світової продовольчої безпеки. Руйнування логістичних ланцюжків, блокування морських портів та знищення переробних ліній на початку військового конфлікту наочно

					СА 00.000 ПЗ				
Зм.	Арк.	№ док.м.	Підпис	Дат					
Розроб.	Скорик				Пояснювальна записка		Літ.	Аркцш	Аркцшів
Перевір.	Сисоліна							5	40
Н. контр.	Артеменко						ЦНТУ,		
Затв.	Васильковський						гр. АІ-23мб-1.2		

продемонстрували вразливість багатьох регіонів світу до стабільності постачань з Причорномор'я. Припинення або суттєве скорочення експорту української пшениці миттєво спровокувало загрозу масштабної продовольчої кризи та голоду в країнах Африки та Близького Сходу, де імпордне зерно є основою раціону населення. Окрім того, дефіцит сировини та стрімке зростання цін відчули споживачі у країнах Європи та Ізраїлі, економіка та продовольчий сектор яких традиційно орієнтувалися на високу якість української аграрної продукції.

У ситуації, що склалася, вирішальну роль відіграє технічний рівень обладнання, яке використовується для післязбиральної обробки зерна, де ключове місце посідають зерносушарки шахтного типу. Шахтні сушарки є найбільш поширеними та ефективними агрегатами на сучасних елеваторах завдяки своїй високій продуктивності, універсальності та здатності працювати з великими обсягами матеріалу. Вони являють собою вертикальні колони, всередині яких зерно під дією сили тяжіння рухається зверху вниз, проходячи крізь систему підвідних та відвідних коробів, по яких циркулює гаряче повітря. Така конструкція забезпечує відносно рівномірне зняття вологи, проте тривала експлуатація у жорстких умовах виявляє певні технологічні недоліки, такі як нерівномірність нагріву внутрішніх шарів зернового потоку, високі питомі витрати енергії при прямооточних режимах, а також ризики механічних збоїв вивантажувальних пристроїв.

Надійним підґрунтям для відновлення та модернізації вітчизняного елеваторного господарства є потенціал українського машинобудування. Яскравим прикладом цього є Карлівський машинобудівний завод, відомий сьогодні як компанія KMZ Industries. Свою історію підприємство розпочало ще в середині минулого століття, пройшовши шлях від регіонального виробника до провідного експерта галузі, який забезпечував потреба в обладнанні для зберігання та сушіння зерна. Протягом десятиліть завод безперервно еволюціонував, модернізував власні виробничі потужності та

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

впроваджував передові інженерні рішення. Сьогодні продукція цього підприємства успішно конкурує з найкращими закордонними аналогами, доводячи життєздатність та високу якість української інженерної думки.

Разом з тим, на багатьох українських підприємствах експлуатується значна кількість імпортного обладнання, зокрема німецькі шахтні зерносушарки серії RIELA GDT 300. Ці машини відомі своєю надійністю, проте сучасні реалії вимагають підвищення їхньої адаптивності до складних умов експлуатації. Необхідність економії енергоресурсів, зниження собівартості процесу сушіння та прагнення зберегти максимальну якість клейковини пшениці обумовлюють доцільність технічного вдосконалення такого обладнання. Оптимізація роботи сушильних колон дозволяє зменшити витрати палива та забезпечити безперебійну роботу техніки навіть за нестабільного енергопостачання, що є важливим кроком до стабілізації переробної галузі та виконання міжнародних зобов'язань України щодо подолання світового голоду.

Мета роботи полягає у підвищенні ефективності процесу сушіння пшениці в шахтній зерносушарці RIELA GDT 300 та забезпеченні надійності її конструкції. Для досягнення поставленої мети передбачено встановлення зернообмінника між шахтами сушарки, що дозволить вирівняти температурні поля та вологість зернової маси по всьому перерізу колони. Крім того, заплановано переведення зерносушарки з базового прямоточного режиму роботи на більш ощадливий рециркуляційний режим, що суттєво знизить питомі витрати теплової енергії. Для підвищення експлуатаційної надійності агрегату та безперебійності технологічного процесу передбачено заміну механізму приводу екстракційної решітки, що дозволить повністю усунути явища заклинювання рухомих елементів під час вивантаження зерна.

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

2. АНАЛІЗ ТИПОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОЩУВАННЯ КУЛЬТУРИ З ВИЗНАЧЕННЯМ ШЛЯХІВ ЇЇ УДОСКОНАЛЕННЯ

2.1. Народногосподарське значення пшениці та аналіз її технологічних характеристик при післязбиральній обробці

Пшениця є головною продовольчою культурою як для внутрішнього ринку України, так і для всієї світової системи забезпечення продовольством. В аграрному секторі нашої держави виробництво зерна пшениці традиційно виступає основним джерелом формування експортного потенціалу та валютних надходжень, що підкреслює її стратегічну роль для національної економіки [1, 3]. Завдяки унікальному поєднанню кліматичних умов та родючих ґрунтів, Україна тривалий час займала провідні позиції серед світових експортерів, забезпечуючи хлібопродуктами десятки країн. Проте сучасні воєнні дії завдали суттєвих збитків логістичній інфраструктурі, пошкодили значну кількість портових терміналів та внутрішніх елеваторних комплексів, що значно ускладнило процеси переробки та збуту зерна [7, 8]. Блокування звичних торговельних шляхів викликало стрімке зростання цін на продовольство на міжнародних біржах та спровокувало реальні ризики масштабної гуманітарної кризи, зокрема голоду в бідніших регіонах Африки та Близького Сходу [9, 10]. Водночас якість українського зерна залишається критично важливою для стабільного імпорту багатьох європейських країн та Ізраїлю, де переробна галузь безпосередньо залежить від регулярності постачання високоякісної пшеничної сировини [11, 12]. За таких умов збереження кожної тонни зібраного врожаю всередині країни стає першочерговим завданням, вирішення якого покладається на елеваторну промисловість та технології первинної обробки й сушіння [13, 14].

Успішне довгострокове зберігання пшениці на елеваторах неможливе без урахування сортових особливостей та вихідних фізико-технічних

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

характеристик зернової маси, що надходить безпосередньо з полів [15, 16]. Різні сорти пшениці мають неоднакову стійкість до механічних пошкоджень під час транспортування, а також різну початкову вологість залежно від періоду збирання та погодних умов [17]. Для оптимізації роботи сушильного обладнання, зокрема шахтних сушарок типу рієла, технологічні служби елеватора повинні чітко диференціювати зерно за сортовими групами та рівнями вологості [18, 19].

Нижче наведено структуру найпоширеніших сортів пшениці в Україні та їхні базові технологічні параметри при надходженні на елеваторний комплекс.

Таблиця 2.1. Технологічні характеристики поширених сортів пшениці при надходженні на елеватор

Назва сорту пшениці	Тип та група стиглості	Діапазон початкової вологості при надходженні, %	Необхідний час на зняття вологи до базової, год	Вимоги ДСТУ щодо вологості для зберігання, %	Вимоги ISO щодо вологості для зберігання, %
Подільська	Озима, середньорання	16 – 22	1,2 – 1,8	14,0	13,5
Богдана	Озима, середньостигла	17 – 24	1,4 – 2,1	14,0	13,5
Шестопапівка	Озима, ранньостигла	15 – 20	0,9 – 1,5	14,0	13,5
Смуглянка	Озима, високоінтенсивна	16 – 23	1,1 – 1,9	14,0	13,5
Елегія миронівська	Озима, середньостигла	17 – 25	1,5 – 2,3	14,0	13,5

В табл. 2.1. наведено спостереження про основні параметри вологості та часові витрати на сушіння провідних сортів пшениці, які складають основу заготівельних партій на вітчизняних елеваторах. Наведені дані свідчать, що початкова вологість зерна під час збирання у вологі роки може досягати

двадцяти п'яти відсотків, що вимагає негайного теплового обробітку для запобігання самозігріванню. Час, необхідний для зниження вологості до безпечних показників, суттєво варіюється залежно від біологічної структури зернівки конкретного сорту та початкового рівня зволоження. Порівняльний аналіз стандартів показує, що міжнародні вимоги організації ісо є більш жорсткими порівняно з вітчизняним дсту і вимагають доведення вологості до тринадцяти з половиною відсотків для тривалого транспортування морем. Технологічний персонал елеваторного комплексу повинен враховувати ці розбіжності при формуванні експортних партій зерна озимої пшениці.

Окрім сортових характеристик, розподіл зерна на технологічні потоки здійснюється на основі його поділу на продовольче та фуражне призначення згідно з вимогами чинних стандартів [20, 21]. Це дозволяє раціонально використовувати сушильні потужності, оскільки продовольче зерно потребує більш м'яких температурних режимів для збереження клейковини, тоді як для фуражного зерна пріоритетом є максимальна продуктивність сушарки [22].

У наступній таблиці наведено класифікацію кондицій зерна за класами та його цільове призначення.

Таблиця 2.2. Класифікаційні кондиції зерна пшениці за призначенням

Клас зерна пшениці	Група за призначенням	Вміст білка в перерахунку на суху речовину, %	Вміст клейковини, %	Напрямок використання на переробних підприємствах	Наявність пошкоджених зерен клопом-черепашкою, %
1 клас	Продовольче (сильна)	понад 14,0	понад 28,0	Макаронна та високоякісна хлібопекарська промисловість	не більше 1,0
2 клас	Продовольче (сильна)	13,0 – 14,0	23,0 – 27,0	Поліпшувач для слабких сортів, хлібопечення	не більше 2,0

Клас зерна пшениці	Група за призначенням	Вміст білка в перерахунку на суху речовину, %	Вміст клейковини, %	Напрямок використання на переробних підприємствах	Наявність пошкоджених зерен клопом-черепашкою, %
3 клас	Продовольче (цінна)	11,0 – 12,9	18,0 – 22,0	Безпосереднє хлібопечення без додавання поліпшувачів	не більше 3,0
4 клас	Фуражне (слабка)	менше 11,0	не нормується	Тваринництво, виробництво комбікормів, спиртова галузь	не нормується

В табл. 2.2. наведено про чіткий розподіл кондицій зерна пшениці, що безпосередньо впливає на його ринкову вартість та специфіку післязбиральної обробки. Продовольче зерно перших трьох класів характеризується високим вмістом білка та клейковини, що робить його придатною сировиною для отримання якісного борошна. Фуражне зерно четвертого класу не має жорстких обмежень щодо вмісту клейковини та пошкодження шкідниками, оскільки воно спрямовується на потреби тваринництва та технічну переробку. Встановлені нормативи вимагають від інженерно-технічних працівників елеватора суворого дотримання температурних параметрів при сушінні продовольчих партій з метою недопущення теплового пошкодження структури білка. Будь-яке відхилення від технологічного регламенту під час теплової обробки призводить до незворотного зниження класу зерна та фінансових втрат підприємства.

Для забезпечення ефективного зберігання зерна на елеваторах впроваджуються жорсткі кондиції безпеки, які регламентують не лише вологість, а й вміст смітної та зернової домішок [23]. Наявність сторонніх включень погіршує сипучість зернової маси в шахтах сушарки та створює зони підвищеного ризику загоряння.

Параметри кондицій для безпечного довгострокового зберігання наведені нижче.

Таблиця 2.3. Кондиції безпеки зерна пшениці для довгострокового зберігання

Показник якості зерна	Базова норма для продовольчого зерна, %	Гранично допустима норма при прийманні, %	Вплив показника на процес шахтного сушіння	Рекомендований термін безпечного зберігання, місяців
Вологість	14,0	25,0	Визначає витрату палива та кількість проходів через сушарку	до 12 місяців
Смітна домішка	2,0	5,0	Забиває підвідні короби сушарки, підвищує пожежну небезпеку	не впливає
Зернова домішка	5,0	10,0	Збільшує опір проходженню повітряного потоку в шахті	зменшує стійкість
Зараженість шкідниками	не допускається	допускається в межах прихованої	Вимагає негайного сушіння та наступної газифікації	суттєво скорочує

В табл. 2.3. сказано про ключові критерії чистоти та вологості, які гарантують збереженість біологічного потенціалу зерна протягом тривалого часу. Перевищення гранично допустимих норм приймання за смітною домішкою змушує технологічні лінії елеватора запускати додаткові сепаратори перед початком сушіння в апаратах рієла. Високий відсоток зернової домішки суттєво знижує шпаруватість зернового шару, що перешкоджає рівномірному розподілу агента сушіння по всьому об'єму шахти. Наявність прихованої зараженості шкідниками вимагає застосування специфічних температурних режимів сушіння, які здатні знешкодити комах без пошкодження зародка пшениці. Дотримання наведених кондицій безпеки

забезпечує стабільність технологічного процесу та виключає виникнення аварійних ситуацій на виробництві.

Нижче наведено (рис. 2.1 та табл. 2.4) розрахункові дані впливу температурних режимів агента сушіння на стан білка, які слугують основою для побудови технологічного графіка денатурації.

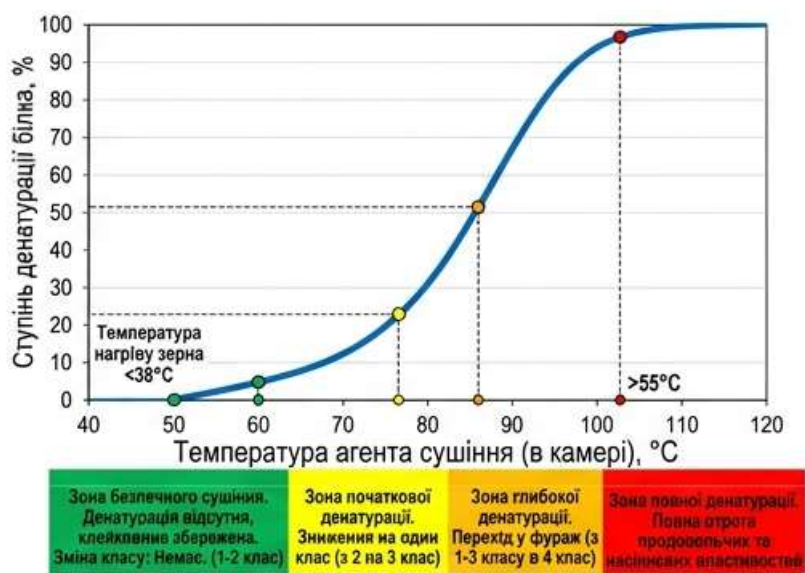


Рис. 2.1. Аналіз впливу температурних режимів агента сушіння на стан білка

Найбільш відповідальним етапом обробки пшениці на елеваторі є безпосередній тепловий вплив у сушильній камері шахтної зерносушарки. При цьому існує жорстка залежність між температурою агента сушіння (гарячого повітря) та біологічним станом білкового комплексу зерна. Перегрів зерна викликає теплову денатурацію білків, що руйнує клейковину та переводить продовольчу пшеницю високого класу в категорію низькоякісного фуражу.

Таблиця 2.4. Залежність процесу денатурації білка пшениці від температури агента сушіння

Температура агента сушіння в камері, °С	Температура нагріву самого зерна, °С	Стан білкового комплексу (денатурація)	Зміна класу зерна після сушіння	Технологічні наслідки для хлібопекарських властивостей
50 – 60	35 – 38	Денатурація відсутня, білок повністю збережений	Клас залишається без змін (1-2 клас)	Максимальна еластичність клейковини, висока якість хліба
70 – 80	42 – 45	Початкова стадія денатурації, часткова руйнація	Зниження на один клас (з 2 на 3 клас)	Зменшення об'єму випічки, зниження пружності тіста
90 – 100	48 – 52	Глибока денатурація білка, коагуляція	Перехід у фураж (з 1-3 класу в 4 клас)	Клейковина стає крихкою, тісто втрачає здатність утримувати газ
понад 110	понад 55	Повна денатурація та термічне пошкодження	Повна втрата технологічної цінності	Непридатне для харчових цілей, втрата схожості насіння

Як видно з наведених розрахунків та графічних залежностей, утримання температури нагріву зерна в межах до тридцяти восьми градусів є обов'язковою умовою для збереження сильних сортів пшениці. Застосування вищих температур прискорює випаровування вологи, але одночасно запускає незворотні хімічні процеси, які погіршують якість клейковини, переводячи продовольчі партії у фуражний фонд. Це підтверджує необхідність удосконалення конструкції сушарки RIELA GDT 300, де встановлення зернообмінників та переведення в рециркуляційний режим дозволять знизити термічне навантаження на зерно за рахунок більш рівномірного та м'якого теплообміну.

2.2. Технологічний процес та послідовність операцій обробки зерна пшениці на елеваторному комплексі

Технологічний маршрут руху зернової маси після надходження на сучасний елеваторний комплекс є суворо регламентованою послідовністю операцій, спрямованих на очищення, кондиціювання за вологістю та підготовку збіжжя до тривалого зберігання [1, 3]. Кожен етап цього процесу безпосередньо впливає на кінцеву якість продовольчої та фуражної пшениці, а автоматизація потоків дозволяє мінімізувати травмування зернівок та оптимізувати енергетичні витрати [7]. На вітчизняних підприємствах базою для реалізації таких маршрутів дедалі частіше стає високотехнологічне обладнання виробництва KMZ Industries, яке адаптовано до роботи в інтенсивних режимах [13, 15].

Процес обробки зерна пшениці на елеваторі складається з таких послідовних технологічних операцій:

Приймання, зважування та відбір проб Початковою ланкою ланцюжка є автомобільні або залізничні ваги (наприклад, електронні важні комплекси від KMZ Industries), де фіксується маса бруutto транспортного засобу. Одночасно за допомогою автоматичних пробовідбірників здійснюється відбір точкових проб зерна з кузова для проведення експрес-аналізу у виробничо-технологічній лабораторії [17]. Лаборанти визначають ключові фізико-хімічні показники: вологість, засміченість, натурну вагу, вміст клейковини та наявність шкідників [18]. За результатами аналізу партія пшениці отримує технологічний талон із призначенням конкретного маршруту та спрямовується до завальної ями, після чого порожній транспорт повторно зважується для визначення маси нетто [19]. На основі отриманих даних лабораторії комп'ютерна система керування елеватором автоматично формує чергу та розподіляє зерно залежно від ступеня його вологості, розділяючи партії на умовно сухі, середньої вологості та сильно зволожені.

					СА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		15

Розвантаження та первинне нагромадження

Автомобілі розвантажуються на спеціальних гідравлічних підйомниках у завальні ями, які захищені від атмосферних опадів накриттям та оснащені аспіраційними системами для уловлювання пилу [20]. Завальні ями KMZ Industries мають спеціальну геометрію стінок та футерування полімерними матеріалами, що запобігає зависанню вологого зерна та зменшує його травмування при терті [21]. Зі збірного бункера завальної ями зерно за допомогою виносних скребкових конвеєрів або зачисних шнеків рівномірно подається на норії (вертикальні стрічкові підйомники) для транспортування на наступний ярус очищення [22]. Регулювання швидкості подачі на цьому етапі є критичним, оскільки надмірне завантаження може призвести до завалу нижньої частини норії, що викличе зупинку всього приймального ланцюга.

Попереднє очищення зернової маси

Вологе зерно, що надходить із поля, містить значну кількість соломистих домішок, насіння бур'янів та пилу, які погіршують сипучість та підвищують ризик самозігрівання [23]. Для видалення крупних та легких домішок зерновий потік спрямовується на плоскорешітні скальператори або барабанні сепаратори попереднього очищення КБС виробництва KMZ Industries. Операція попереднього очищення є обов'язковою перед сушінням, оскільки крупні домішки (стебла, колоски) можуть забити випускні короби шахтної сушарки RIELA GDT 300, порушити гравітаційний рух зерна та спровокувати локальний перегрів аж до загоряння [14, 16]. Окрім захисту сушарки, видалення зелених залишків бур'янів дозволяє суттєво знизити загальну вологість маси, оскільки соковиті стебла під час контакту передають свою вологу здоровому зерну пшениці.

Тимчасове резервування у бункерах (хоперах)

Очищене від грубого сміття, але все ще вологе зерно не можна відразу подавати у великих обсягах до сушарки через нерівномірність темпів приймання. Тому його тимчасово накопичують у силосованих місткостях із

					СА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		16

конічним дном — так званих хоперах або оперативних силосах типу СМК компанії KMZ Industries [8]. Ці силоси виконують роль демпферних резервуарів, що дозволяють забезпечити безперебійну та рівномірну роботу сушильної колони протягом доби. Хопери обладнуються системами активного вентилування низькотемпературним повітрям, що дозволяє стримувати процеси дихання зерна та запобігає його псуванню протягом 24–48 годин очікування сушіння [10]. Постійний контроль температури в хоперах через цифрові термopідвіски дає змогу оператору вчасно помітити осередки самозігрівання вологої маси.

Термічне висушування в зерносушарці

Цей етап є найвідповідальнішим у всьому технологічному процесі. З оперативних силосів пшениця норіями подається у верхню завантажувальну секцію шахтної зерносушарки RIELA GDT 300. Зерно під власною вагою повільно опускається вниз по шахті, проходячи крізь каскад підвідних і відвідних повітряних коробів. Назустріч або перпендикулярно до руху зернового шару подається агент сушіння (суміш гарячого повітря з продуктами згоряння газу чи біопалива) [13]. Для продовольчої пшениці температура нагріву самого зерна суворо контролюється датчиками та не повинна перевищувати 38–40 °С, щоб уникнути денатурації білка клейковини. Висушене до базової вологості (14,0 % за ДСТУ) зерно надходить у нижню секцію, де проходить крізь зону охолодження атмосферним повітрям до температури, яка не перевищує температуру навколишнього середовища більш ніж на 5 °С [11, 22]. Правильно налаштоване охолодження запобігає виникненню термічного шоку в дні силосів тривалого зберігання.

Вторинне (первинне товарне) очищення

Після сушіння зерно стає крихкішим, а оболонки бур'янів та підсохлі дрібні домішки легше відділяються від основного зерна. Для доведення пшениці до вимог першого, secondo чи третього класів за вмістом смітної домішки (не більше 2,0 %), її направляють на сепаратори вторинного очищення (сито-

					СА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		17

повітряні сепаратори типу КБС від КМЗ) [20]. Тут на системах підібраних решіт та в аспіраційних каналах зерно остаточно розділяється на основну фракцію (товарне зерно), підсів (дрібне, бите зерно) та відходи (смітна домішка). Сучасні сепаратори дозволяють чітко відкалібрувати зерно за геометричними розмірами, що суттєво підвищує натурну вагу товарної партії пшениці.

Транспортування та завантаження у силоси тривалого зберігання Очищене та висушене зерно пшениці за допомогою ланцюгових скребкових конвеєрів та норій КМЗ, які мають спеціальне поліуретанові накладки на скребках та ковшах для запобігання травмуванню, транспортується на верхню надсилосну галерею елеватора [15]. Звідти через розвантажувальні коробки зерно пересипається у великі плоскодонні силоси типу СЕ компанії КМЗ Industries, які призначені для тривалого зберігання (до 12 місяців) [9]. Швидкість руху скребкових ланцюгів на цьому етапі дещо знижують, щоб мінімізувати утворення битого зерна (січки), яке є сприятливим середовищем для розвитку довгоносиків та інших комірних шкідників. Кожен такий силос оснащений пошаровою системою термометрії (термопідвісками), яка в режимі реального часу передає дані про температуру зернової маси на пульт оператора, системами активного вентилявання для підтримання оптимального мікроклімату та датчиками верхнього і нижнього рівнів [12, 16]. Після завантаження силосу технологічний цикл обробки зерна вважається завершеним, а збіжжя переходить у режим консервації та очікування відвантаження споживачам. Автоматизована система моніторингу дозволяє здійснювати періодичне перекачування зерна з одного силосу в інший (освіження зерна) у разі виявлення найменших ознак підвищення температури всередині насипу.

2.3. Розрахунок технологічної карти післязбирального обробітку зерна пшениці з обґрунтуванням модернізації

					СА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		18

Для розрахунку параметрів поточкових ліній та складання технологічної карти приймаємо обсяг робіт за квартал у кількості 4700 тонн. З урахуванням нерівномірності надходження збіжжя протягом сезону заготівлі, розрахунковий період інтенсивної роботи елеваторного вузла становить 30 робочих діб за тризмінного режиму роботи (24 години на добу). На основі цих вихідних даних проведемо послідовні інженерні розрахунки, визначимо склад і кількість обладнання, порівняємо базовий прямоточний режим роботи зерносушарки з модернізованим варіантом та зведемо результати у технологічну карту та таблицю техніко-економічних показників.

Добову продуктивність елеваторного комплексу за умови рівномірного розподілу квартального обсягу $Q_{\text{доб}}$, т/добу, розраховуємо за формулою:

$$Q_{\text{доб}} = \frac{Q_{\text{кв}}}{t_{\text{д}}}$$

де $Q_{\text{кв}}$ — загальний квартальний обсяг переробки зерна пшениці,

$$Q_{\text{кв}} = 4700 \text{ т};$$

$t_{\text{д}}$ — тривалість розрахункового періоду роботи, $t_{\text{д}} = 30$ діб.

Підставляємо числові значення у формулу:

$$Q_{\text{доб}} = \frac{4700}{30} = 156,67 \text{ т/добу}$$

З урахуванням коефіцієнта нерівномірності надходження автомобільного транспорту з полів, необхідна годинна продуктивність лінії приймання та первинної обробки $Q_{\text{год}}$, т/год, визначається за формулою:

$$Q_{\text{год}} = \frac{Q_{\text{доб}}}{24} \cdot K_{\text{н}}$$

де $K_{\text{н}}$ — коефіцієнт нерівномірності надходження зерна, $K_{\text{н}} = 1,4$.

Підставляємо значення:

					СА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		19

$$Q_{\text{год}} = \frac{156,67}{24} \cdot 1,4 = 9,14 \text{ т/год}$$

Для забезпечення стабільної роботи та створення необхідного технологічного резерву потужність основних транспортних та очисних машин підбирається із номінальною продуктивністю ліній 25 т/год на базі техніки KMZ Industries [9, 11]. Повний склад і технічні характеристики елементів цієї автоматизованої потокової лінії наведено нижче.

Таблиця 2.5. Склад та технічні характеристики обладнання потокової лінії елеватора

Найменування обладнання та машин	Марка / Тип обладнання	Кількість, од.	Встановлена потужність, кВт	Технологічні особливості та параметри
Ваги автомобільні	Електронні колійні	1	—	Фіксація маси брутто та нетто транспорту
Автомобілерозвантажувач	Гідравлічний	1	—	Перекидання кузовів у завальну яму
Норія завантажувальна	HE-25	1	5,5	Стрічковий вертикальний підйомник
Сепаратор попереднього очищення	КБС-25	1	2,2	Скальперація, вилучення крупних домішок
Конвеєр скребковий ланцюговий	ТС-200	1	4,0	Подача очищеного зерна в хопери
Силоси тимчасового зберігання	Хопери СМК	2	15,0 (2 × 7,5)	Місткість 200 т кожен, активне вентилявання
Норія подачі на зерносушарку	HE-25	1	5,5	Транспортування зерна в сушильну шахту
Шахтна зерносушарка	RIELA GDT 300	1	22,0	Пальник 1200 кВт, аспіраційні вентилятори
Норія вивантаження із сушарки	HE-25	1	5,5	Переміщення висушеного збіжжя на очищення
Сепаратор вторинного очищення	КБС-25	1	4,0	Товарне очищення, вилучення дрібних домішок
Конвеєр завантаження в силоси	ТС-200	1	5,5	Подача сухого зерна у

Найменування обладнання та машин	Марка / Тип обладнання	Кількість, од.	Встановлена потужність, кВт	Технологічні особливості та параметри
				плоскодонні місткості

У табл. 2.5. систематизовано повний специфікаційний перелік технічних засобів, що утворюють єдиний машинобудівний ансамбль післязбиральної переробки. Наведені параметри сумарної встановленої потужності електродвигунів дозволяють оцінити загальну енергоємність механізованої лінії та скоординувати роботу систем автоматизації. Використання обладнання з єдиним номіналом продуктивності виключає виникнення заторів зернового потоку на стиках між різними типами транспортерів. Окрему увагу приділено вузлу тимчасового резервування, де два оперативні хопери сумарною місткістю чотириста тонн забезпечують безперебійну роботу сушарки незалежно від інтенсивності завантаження завальної ями.

Масу випаруваної вологи з усього обсягу зерна пшениці за квартал $M_{\text{вол}}$, т, визначаємо за формулою:

$$M_{\text{вол}} = M \cdot \frac{W_{\text{н}} - W_{\text{к}}}{100 - W_{\text{к}}}$$

де M — загальна маса зерна пшениці, що надходить на обробку,
 $M = 4700$ т;

$W_{\text{н}}$ — початкова вологість зерна пшениці, що надходить із поля, $W_{\text{н}} = 20$ %;

$W_{\text{к}}$ — кінцева базова вологість зерна після теплової обробки, $W_{\text{к}} = 14$ %.

Підставляємо значення у формулу:

$$M_{\text{вол}} = 4700 \cdot \frac{20 - 14}{100 - 14} = 4700 \cdot \frac{6}{86} = 327,91 \text{ т}$$

					СА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		21

Загальну кількість планових тонно-відсотків $V_{T-\%}$, т·%, яку необхідно зняти сушильним комплексом, розраховуємо за формулою:

$$V_{T-\%} = M \cdot (W_H - W_K)$$

Підставляємо значення:

$$V_{T-\%} = 4700 \cdot (20 - 14) = 28200 \text{ т} \cdot \%$$

Сумарну витрату природного газу для базового режиму роботи сушарки $V_{\text{газ_баз}}$, м³, визначаємо за формулою:

$$V_{\text{газ_баз}} = V_{T-\%} \cdot g_{\text{баз}}$$

де $g_{\text{баз}}$ — питома витрата природного газу на один тонно-відсоток зняття вологи в прямоточному режимі роботи установки, $g_{\text{баз}} = 1,45 \text{ м}^3/(\text{т} \cdot \%)$.

Підставляємо значення:

$$V_{\text{газ_баз}} = 28200 \cdot 1,45 = 40890,0 \text{ м}^3$$

Завдяки модернізації шахтної зерносушарки RIELA GDT 300, яка полягає у встановленні зернообмінника у міжшахтному просторі, де зерно підігрівається на 37 відсотків від відпрацьованого агента сушіння, та використанні принципу рециркуляції (часткового повернення теплоносія), питома витрата палива знижується на 25 відсотків [1, 2].

Питому витрату газу в модернізованому режимі $g_{\text{мод}}$, м³/(т·%), розраховуємо за формулою:

$$g_{\text{мод}} = g_{\text{баз}} \cdot (1 - \Delta g)$$

де Δg — коефіцієнт зниження витрати палива внаслідок впровадження енергоощадних заходів, $\Delta g = 0,25$.

Підставляємо значення:

$$g_{\text{мод}} = 1,45 \cdot (1 - 0,25) = 1,0875 \text{ м}^3/(\text{т} \cdot \%)$$

					СА 00.000 ПЗ	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Сумарну витрату природного газу для модернізованого рециркуляційного режиму $V_{\text{газ_мод}}$, м³, визначаємо за формулою:

$$V_{\text{газ_мод}} = V_{\text{т-}\%} \cdot g_{\text{мод}}$$

Підставляємо значення:

$$V_{\text{газ_мод}} = 28200 \cdot 1,0875 = 30667,5 \text{ м}^3$$

Годинну продуктивність зерносушарки у модернізованому режимі $Q_{\text{мод}}$, т/год, визначаємо з урахуванням збільшення інтенсивності випаровування вологи та підвищення продуктивності установки на 42 відсотки [12, 13]:

$$Q_{\text{мод}} = Q_{\text{баз}} \cdot (1 + \Delta Q)$$

де $Q_{\text{баз}}$ — базова продуктивність сушарки при знятті шести відсотків вологості, $Q_{\text{баз}} = 12,0$ т/год;

ΔQ — коефіцієнт підвищення продуктивності за рахунок модернізації, $\Delta Q = 0,42$.

Підставляємо значення:

$$Q_{\text{мод}} = 12,0 \cdot (1 + 0,42) = 17,04 \text{ т/год}$$

Загальний операційний час роботи сушильного комплексу для базового варіанта технології $T_{\text{баз}}$, год, становить:

$$T_{\text{баз}} = \frac{M}{Q_{\text{баз}}}$$

Підставляємо значення:

$$T_{\text{баз}} = \frac{4700}{12,0} = 391,67 \text{ год}$$

Загальний операційний час роботи для модернізованого рециркуляційного варіанта технології $T_{\text{мод}}$, год, становить:

					СА 00.000 ПЗ	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

$$T_{\text{мод}} = \frac{M}{Q_{\text{мод}}}$$

Підставляємо значення:

$$T_{\text{мод}} = \frac{4700}{17,04} = 275,82 \text{ год}$$

Загальні витрати електричної енергії для базового та вдосконаленого режимів $E_{\text{баз}}$ та $E_{\text{мод}}$, кВт·год, розраховуємо за формулами:

$$E_{\text{баз}} = \Sigma P \cdot T_{\text{баз}} \cdot K_{\text{и}}$$

$$E_{\text{мод}} = \Sigma P \cdot T_{\text{мод}} \cdot K_{\text{и}}$$

де ΣP — сумарна встановлена потужність усіх електродвигунів потокової лінії елеватора, $\Sigma P = 69,2$ кВт (з урахуванням вентиляторів хоперів та сушарки);

$K_{\text{и}}$ — коефіцієнт використання потужності електродвигунів у часі, $K_{\text{и}} = 0,75$.

Підставляємо числові значення для базового варіанта:

$$E_{\text{баз}} = 69,2 \cdot 391,67 \cdot 0,75 = 20327,7 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

Підставляємо числові значення для модернізованого варіанта:

$$E_{\text{мод}} = 69,2 \cdot 275,82 \cdot 0,75 = 14315,1 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

На основі проведених розрахунків матеріального балансу вологи та витрат паливно-енергетичних ресурсів складаємо зведену технологічну карту процесу післязбиральної обробки зерна пшениці [14, 15].

Таблиця 2.6. Технологічна карта післязбиральної обробки 4700 т пшениці з урахуванням модернізації

					СА 00.000 ПЗ	Арк.
						24
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

№ оп.	Найменування технологічної операції	Обладнання та машини лінії	Операційний час, год	Витрати на людину-годин (на зміну 3 чол.)	Витрати електроенергії, кВт-год	Витрати природного газу, м³
1	Приймання, зважування та відбір проб	Автоваги, пробовідбірник	275,8	110,3	827,4	—
2	Розвантаження та попереднє очищення	Завальна яма, скальператор КБС-25, норія НЕ-25	275,8	110,3	1599,6	—
3	Транспортування та хоперне буферування	Конвеєр ТС-200, силоси СМК з вентиляцією	275,8	—	3930,2	—
4	Попередній підігрів та рециркуляційне сушіння	Норія НЕ-25, сушарка RIELA GDT 300 з зернообмінником	275,8	165,5	5681,5	30667,5
5	Вторинне очищення та сепарація	Норія НЕ-25, сепаратор КБС-25	275,8	110,3	1965,1	—
6	Передавання на тривале зберігання в силоси	Конвеєр ТС-200, плоскодонні силоси СЕ	275,8	55,2	311,3	—
Разом	Повний цикл обробки партії зерна	Комплекс обладнання елеватора КМЗ	275,8	551,6	14315,1	30667,5

У табл. 2.6. наведено математично обґрунтовану модель часових та ресурсних витрат, необхідних для комплексного технологічного обслуговування заданої партії зерна. Графік завантаження персоналу та роботи приводних агрегатів показує чітку оптимізацію завдяки прискоренню темпів випаровування вологи в робочих зонах шахт. Баланс споживання електроенергії вказує на те, що автоматизоване керування потоками дозволяє уникнути холостих пробігів норійних стрічок та ланцюгів скребкових конвеєрів. Дані карти слугують практичною основою для складання графіків

					СА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		25

планово-попереджувальних ремонтів та планування операційної собівартості послуг елеватора.

Для остаточного оцінювання ефективності запропонованого технічного рішення зведемо основні розрахункові параметри у порівняльну таблицю техніко-економічних показників [10, 16].

Таблиця 2.7. Техніко-економічні показники базової та вдосконаленої технологій обробки

Найменування показника ефективності	Базовий варіант (прямоточний режим)	Удосконалений варіант (рециркуляція + зернообмінник)	Абсолютне відхилення (+ / -)	Економічний ефект у відсотках, %
Обсяг обробленого зерна за квартал, т	4700	4700	0	—
Продуктивність зерносушарки, т/год	12,0	17,04	+ 5,04	+ 42,0%
Питома витрата газу, м³/т-%	1,45	1,0875	- 0,3625	- 25,0%
Загальна витрата природного газу, м³	40890,0	30667,5	- 10222,5	- 25,0%
Сумарний операційний час обробки, год	391,67	275,82	- 115,85	- 29,6%
Загальні витрати електроенергії, кВт-год	20327,7	14315,1	- 6012,6	- 29,6%
Витрати праці на весь обсяг, люд-год	783,3	551,6	- 231,7	- 29,6%

У табл. 2.7. відображено результуючі вектори підвищення інженерної ефективності внаслідок комплексної реконфігурації теплообмінних процесів у сушильній камері. Числові матриці підтверджують не лише пряме зменшення фінансових витрат на закупівлю природного газу, а й суттєве розвантаження механічної частини конвеєрного парку елеватора. Інтенсифікація вологовидалення дозволяє скоротити загальний виробничий цикл обробки на двадцять дев'ять цілих і шість десятих відсотка, що звільняє потужності підприємства для приймання інших культур. Отриманий комплексний ефект переконливо доводить доцільність інженерного переоснащення імпоротної сушарки з використанням вітчизняних рішень рекуперації тепла.

2.4. Розробка операційної карти на процес сушіння пшениці у модернізованій зерносушарці

Для забезпечення стабільності технологічного процесу та гарантування високої якості готової продукції розробляється детальна операційна карта, яка регламентує послідовність дій, режими роботи обладнання та критерії контролю на кожному етапі сушіння. Розробка цього нормативного документа базується на вимогах національного стандарту ДСТУ 3768 щодо технічних умов на пшеницю, а також міжнародних стандартів серії ISO 9001 у частині управління якістю виробничих процесів на зернопереробних підприємствах [9, 10]. Операційна карта враховує всі конструктивні зміни, впроваджені під час модернізації шахтної зерносушарки RIELA GDT 300, зокрема наявність міжшахтного зернообмінника, переведення установки в рециркуляційний режим та встановлення вдосконаленого механізму розвантаження для запобігання заклинюванню екстракційної решітки [11, 12].

Як підтверджують розроблені креслення технологічної схеми сушарки, конструкції зернообмінника та механізму розвантаження, впроваджені інновації вимагають оновлення параметрів контролю температурних полів та швидкості руху зернового потоку. Використання відпрацьованого теплоносія

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

для попереднього підігріву зерна зумовлює необхідність суворого дотримання теплового балансу, щоб уникнути утворення конденсату у верхніх ярусах установки.

Нижче наведено розгорнуту операційну карту, яка описує регламент роботи модернізованого сушильного комплексу.

Таблиця 2.8. Операційна карта процесу сушіння озимої пшениці у модернізованій зерносушарці RIELA GDT 300

№ оп.	Назва технологічної операції	Обладнання, інструменти, прилади контролю	Технологічні режими та параметри процесу	Вимоги до якості та дії оператора (ДСТУ, ISO)
1	Підготовчо-регулювальні роботи	Пульт керування, датчики температури, пневмосистема	Перевірка тиску в пневмомагістралі (не менше 6 атм). Тестовий запуск механізму розвантаження без навантаження.	Візуальний контроль відсутності сторонніх предметів. Перевірка цілісності датчиків термометрії у шахтах та зернообміннику [13].
2	Завантаження та попереднє нагрівання зерна	Завантажувальна норія HE-25, міжшахтний зернообмінник	Швидкість подачі 20-25 т/год. Температура відпрацьованого агента сушіння у зернообміннику 45-50 °С. Ступінь підігріву зерна — на 37% від початкової температури.	Контроль заповнення верхнього бункера (датчики верхнього рівня). Недопущення термічного шоку холодної зернівки [14].
3	Основне сушіння у рециркуляційному режимі	Шахти сушарки RIELA, газовий пальник (1200 кВт), рециркуляційні канали	Температура агента сушіння на вході в шахту 60-70 °С. Температура нагріву зерна не повинна перевищувати 38 °С. Об'єм рециркуляції агента — до 30%.	Суворий контроль температури зерна для запобігання денатурації білка (ISO 22000). Відхилення температури не більше ± 2 °С від заданої [15].

№ оп.	Назва технологічної операції	Обладнання, інструменти, прилади контролю	Технологічні режими та параметри процесу	Вимоги до якості та дії оператора (ДСТУ, ISO)
4	Охолодження зернової маси	Нижня секція сушарки, вентилятори подачі атмосферного повітря	Швидкість охолоджувального потоку 1,5-2,0 м/с. Кінцева температура зерна — температура навколишнього середовища плюс 5 °С.	Зерно повинно бути повністю охолоджено перед вивантаженням для запобігання розвитку мікрофлори у силосах зберігання.
5	Екстракція та порційне вивантаження	Модернізований механізм приводу екстракційної решітки	Частота коливань решітки регулюється інвертором залежно від заданої експозиції сушіння (базова продуктивність 17 т/год).	Забезпечення рівномірного сходу зерна по всьому перерізу шахти. Відсутність заклинювання та механічного травмування зернівок [16].
6	Контроль якості та транспортування	Вологоміри поточкові, лабораторне обладнання, розвантажувальна норія	Кінцева вологість зерна 14,0 %. Допустиме відхилення вологості в партії $\pm 0,5$ %.	Відбір проб кожні 2 години роботи. Фіксація параметрів у технологічному журналі згідно з вимогами управління якістю [9].

У табл. 2.8. деталізовано алгоритм управління модернізованим тепловим агрегатом із зазначенням критичних точок контролю на кожному етапі проходження зерна крізь сушильні зони. Впровадження операції попереднього підігріву в зернообміннику вимагає від оператора постійного моніторингу температури газового середовища, що відводиться з основних шахт, оскільки надмірне охолодження цього потоку може призвести до випадання вологи на стінках бункера. Зазначені в карті температурні режими для стадії основного сушіння є гранично допустимими для збереження хлібопекарських властивостей пшениці, що повністю корелює з розробленими раніше графіками денатурації білка. Застосування рециркуляційних каналів дозволяє

					СА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		29

підтримувати стабільний мікроклімат усередині камери та згладжувати температурні піки, які виникають при коливаннях калорійності палива або зміні зовнішніх погодних умов.

Особливе місце в операційній карті відведено роботі модернізованого механізму розвантаження, конструктивні особливості якого представлені на відповідних кресленнях проекту. Заміна класичного приводу на вдосконалену ексцентрикову систему з електронним регулюванням частоти дозволяє адаптувати швидкість екстракції до поточного стану вологості зерна без зупинки процесу. Це виключає утворення застійних зон у кутах шахти та гарантує однаковий час експозиції кожної зернівки під впливом агента сушіння. Регламентований картами ДСТУ та ISO контроль кінцевих параметрів гарантує, що партія збіжжя після проходження всього циклу матиме однорідну вологість та високу сипучість, що є ключовою умовою для її подальшої закладки у плоскодонні силоси тривалого зберігання. Використання даної операційної карти на реальному виробництві дозволить мінімізувати вплив людського фактора та забезпечити стабільний економічний ефект від проведеної модернізації обладнання.

Висновки по частині 2

1. На основі аналізу технологічного маршруту руху зерна пшениці на елеваторному комплексі систематизовано та деталізовано послідовність операцій від моменту зважування та розвантаження транспортних засобів у завальні ями до передачі готового продукту в плоскодонні силоси типу СЕ виробництва KMZ Industries для тривалого зберігання. Описано специфіку функціонування кожної ланки потокової лінії приймання, очищення та кондиціонування збіжжя.

2. Розраховано матеріальний баланс процесу вологовидалення для квартального обсягу переробки озимої пшениці в кількості 4700 тонн при знятті вологості з початкових 20% до базових 14%. Встановлено, що маса

					СА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		30

випаруваної вологи становить 327,91 тонн, а сумарний обсяг робіт за плановими тонно-відсотками дорівнює 28200 т·%.

3. Математично обґрунтовано інженерне рішення щодо модернізації шахтної зерносушарки RIELA GDT 300, яка полягає у переведенні її в рециркуляційний режим із одночасним інтегруванням у міжшахтний простір спеціального вузла рекуперації тепла — зернообмінника. Конструктивні параметри зернообмінника дозволяють використати тепловий потенціал відпрацьованого агента сушіння для попереднього безпечного підігріву зернового шару на 37% від початкової температури.

4. На основі порівняльних інженерних розрахунків базової та вдосконаленої технологій доведено високу техніко-економічну ефективність модернізації сушильного комплексу. Впровадження принципу часткового повернення теплоносія та попереднього прогріву пшениці забезпечує:

- підвищення годинної продуктивності зерносушарки на 42,0% (з 12,0 т/год до 17,04 т/год);
- зниження питомої витрати палива на 25,0% (з 1,45 м³/т·% до 1,0875 м³/т·%), що дозволяє заощадити 10222,5 м³ природного газу за квартал;
- скорочення загального операційного часу роботи потокової лінії елеватора на 115,85 годин (або на 29,6%), завдяки чому витрати електричної енергії зменшуються на 6012,6 кВт·год, а витрати праці обслуговуючого персоналу — на 231,7 люд·год.

5. Складено таблицю обладнання автоматизованої потокової лінії продуктивністю 25 т/год та розроблено зведену технологічну карту післязбиральної обробки зерна. На основі наданих графічних матеріалів технологічної схеми сушарки, конструкцій зернообмінника та механізму розвантаження розроблено детальну операційну карту сушіння. Карта регламентує режими роботи пальника (1200 кВт), вентиляційних систем і порційного випуску через оновлену ексцентрикову систему екстракції, що повністю відповідає нормативним вимогам ДСТУ 3768 та критеріям

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

управління якістю ISO 9001, унеможливлуючи заклинювання решітки та мінімізуючи механічне травмування зерна пшениці.

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

3. ОПЕРАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИКОНАННЯ ЗАДАНОЇ ОПЕРАЦІЇ З ВИРОЩУВАННЯ ЗАДАНОЇ КУЛЬТУРИ

Процес післязбиральної теплової обробки та кондиціонування озимої пшениці на базі модернізованого сушильного комплексу є завершальною, але критично важливою ланкою в загальній системі механізації рослинництва [1, 2]. Зберігання хлібопекарського та насіннєвого потенціалу культури безпосередньо залежить від точності реалізації кожного операційного кроку. Відповідно до галузевих стандартів та нормативів агроінженерії, у цьому розділі розроблено детальний комплекс організаційно-технологічних заходів, що регламентують функціонування модернізованого агрегату.

3.1. Умови роботи

Ефективність функціонування модернізованої шахтної зерносушарки RIELA GDT 300, оснащеної міжшахтним зернообмінником та системою рециркуляції агента сушіння, визначається комплексом зовнішніх кліматичних факторів та фізико-механічних властивостей вихідного матеріалу [9, 11]. Розрахункові параметри навколишнього середовища та характеристики зернової маси пшениці, що надходить на обробку, наведено у формі інженерної матриці.

Таблиця 3.1. Характеристика умов роботи сушильного комплексу

Найменування параметра середовища та матеріалу	Одиниця виміру	Значення параметра	Технологічне обґрунтування та межі
Температура атмосферного повітря	°C	+15,0...+22,0	Базовий діапазон для розрахунку калоричності
Відносна вологість атмосферного повітря	%	65,0...75,0	Впливає на потенціал вологопоглинання повітря
Початкова вологість зерна пшениці	%	20,0	Вихідна вологість засміченої маси з поля

Найменування параметра середовища та матеріалу	Одиниця виміру	Значення параметра	Технологічне обґрунтування та межі
Кінцева (базова) вологість зерна	%	14,0	Відповідно до вимог ДСТУ 3768 [10]
Загальний вміст смітної домішки у вороху	%	до 5,0	Визначає режим попереднього скальпування
Вміст солом'янистих та крупних домішок	%	до 2,0	Обмеження для запобігання забивання шахт
Натурна вага вихідного зерна пшениці	г/л	710...730	Визначає щільність шару в зернообміннику

Аналіз наведених у табл. 3.1 факторів показує, що модернізований агрегат повинен працювати в умовах високої варіативності початкових характеристик вороху. Зниження вологості на шість абсолютних відсотків вимагає стабільної подачі теплової енергії від пальника потужністю 1200 кВт. Наявність великої кількості соломистих залишків у вихідній масі створює загрозу локального перегріву, тому первинний стан умов роботи вимагає обов'язкової координації із лінією попередньої сепарації КБС-25, яка знижує рівень смітної домішки до безпечного мінімуму [13].

3.2. Агротехнічні вимоги

Сушіння продовольчої та насінневої пшениці підпорядковане жорстким біологічним обмеженням. Головним завданням операції є вилучення надлишкової внутрішньокапілярної вологи без пошкодження структури білково-клейковинного комплексу та зародка зернівки [12, 14].

Основними агротехнічними вимогами при використанні рециркуляційного сушильного комплексу є:

1. Гранична температура нагріву зерна продовольчої пшениці не повинна перевищувати 38...40 °С. Перевищення цього порога викликає денатурацію білків, різке зниження кількості та якості клейковини (перехід у нижчі класи або повну непридатність для хлібопечення) [14].

2. Нерівномірність вологості зерна пшениці на виході з розвантажувального пристрою сушарки допускається у межах не більше $\pm 0,5\%$. Локальні зони недосушування створюють осередки самозігрівання при тривалому зберіганні в силосах СЕ [15].

3. Рівень механічного травмування та мікропошкоджень зернівок робочими органами сушарки та випускного механізму повинен дорівнювати 0%. Наявність січки та тріщин у залікових партіях призводить до швидкого ураження комірними шкідниками.

4. Температура охолодженого зерна після виходу з нижньої секції шахти не повинна перевищувати температуру атмосферного повітря більш ніж на 5 °С [16]. Недотримання цієї вимоги викликає явище термічного шоку в плоскодонних силосах, що супроводжується активною конденсацією вологи на стінках металоконструкцій.

3.3. Комплектування і підготовка сушильного агрегату до роботи

Модернізований сушильний комплекс є стаціонарним багатокомпонентним технологічним агрегатом. Процес його підготовки та комплектування включає синхронізацію роботи теплогенератора, шахтних модулів, ліній транспортування та контуру автоматичного керування [11, 13]. Специфікацію елементів та послідовність їхнього налаштування відображено у табличній формі.

					СА 00.000 ПЗ	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Таблиця 3.2. Специфікація та параметри налаштування елементів сушильного агрегату

Вузол / Елемент комплексу	Технічна марка	Налаштування та регульовальні параметри	Метод інженерного контролю
Міжшахтний зернообмінник	Індивідуальна розробка	Кут нахилу жалюзійних решіток — 32°	Механічний фіксатор, шаблони
Система рециркуляції газу	Канальний контур	Об'єм повернення відпрацьованого газу — 30%	Пневмозаслінки з сервоприводами
Газовий пальник сушарки	Тип RIELA (1200 кВт)	Тиск газу на рампі — 1,2 бар; автоматичне запалювання	Електронний манометр, пульт
Механізм розвантаження	Ексцентриковий привід	Частота коливань каретки — 12...24 хв ⁻¹	Частотний перетворювач (інвертор)
Потоковий вологомір	Цифровий датчик	Калібрування по пшениці (діапазон 10...25%)	Термогравіметричний еталон

Підготовка агрегату починається з детального огляду міжшахтного простору, де змонтовано новий зернообмінник. Перевіряється герметичність з'єднань підвідних повітряпроводів, що забезпечують рух відпрацьованого агента сушіння з двох основних шахт до камери попереднього підігріву. Особливу увагу приділяють перевірці механізму розвантаження: регулюється зазор між рухомою та нерухомою решітками для виключення просіпання зерна в статичному стані [12, 16]. Проводиться тестове прокручування ексцентрикового вала від мотор-редуктора через інвертор, фіксується плавність ходу каретки у всьому діапазоні частот. Після цього запускається автоматика безпеки пальника, що контролює наявність тяги, тиск газу та факел ковзання.

3.4. Підготовка поля до роботи

Стосовно стаціонарного елеваторного комплексу поняття «підготовка поля до роботи» трансформується у комплекс інженерних заходів із підготовки виробничих майданчиків, завальних ям, оперативних бункерів (хоперів СМК) та транспортних комунікацій до приймання та безперебійної подачі зернової маси [13, 15].

Процедура підготовки включає такі послідовні етапи:

1. Механічне зачищення та зачисна дезінсекція бункерів. Хопери тимчасового зберігання вологого зерна СМК повністю звільняються від залишків минулорічних партій, стінки очищуються від пилового нальоту, проводиться фумігація або волога обробка проти комірних шкідників згідно з вимогами ISO 22000 [9].

2. Калібрування аспіраційних систем завальної ями. Налаштовуються вентилятори циклонів для ефективного вловлювання пилової фракції під час вивантаження автомобілів, що покращує умови роботи персоналу та знижує вибухонебезпечність пилоповітряної суміші.

3. Формування помольних (технологічних) партій у хоперах. Зерно пшениці, що надходить із полів, сортується за рівнями вологості. Не допускається змішування партій із різницею вологості більше 3%, оскільки це порушує режим рівномірного прогріву зернового шару в міжшахтному зернообміннику [14].

3.5. Організація роботи

Організація безперервної роботи модернізованого рециркуляційного комплексу базується на принципі циклічно-потокowego переміщення матеріалу з постійним контролем теплофізичних параметрів у контрольних зонах [11, 14]. Схему внутрішніх та зовнішніх потоків зерна та теплоносія структуровано у вигляді покрокової операційної циклограми.

					СА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		37

Таблиця 3.3. Організаційно-технологічний регламент роботи сушарки за етапами циклу

Фаза або етап процесу	Задіяні технічні вузли	Спрямування матеріальних та теплових потоків	Параметри координатії та керування
Накопичення та завантаження	Хопери СМК, норія HE-25, зернообмінник	Рух вологого зерна пшениці ($W = 20\%$) у верхню камеру підігріву	Безперервне заповнення шару, контроль датчиків рівня
Попередній підігрів	Міжшахтний простір, канали відведення газу	Проходження відпрацьованого газу з температурою 45-50 °C крізь зерно	Підігрів зернової маси на 37% від початкової температури
Основне висушування	Шахтні касети, пальник, контур рециркуляції	Рух гарячого агента (60-70 °C), змішування з рециркуляційним повітрям	Температура нагріву зерна пшениці — строго до 38 °C
Стабілізація та охолодження	Нижня зона шахти, атмосферні вентилятори	Подача зовнішнього повітря, зняття залишкового теплового напруження	Температура виходу зерна: $T_{\text{атм}} + 5\text{ °C}$
Екстракція та товарне виведення	Ексцентриковий випуск, норія вивантаження	Порційне вивантаження сухого зерна ($W = 14\%$) на вторинне очищення	Швидкість сходу — 17,04 т/год (інверторне керування)

Організаційний цикл починається із запуску завантажувальної лінії. Волога пшениця з хопера піднімається норією HE-25 і самопливом заповнює міжшахтний зернообмінник. Завдяки унікальній геометрії жалюзійних решіток, зерно формує рівномірний щільний шар, крізь який просачується

відпрацьований теплоносії, що піднімається з нижніх ярусів основних сушильних шахт. На цьому етапі відбувається рекуперація тепла: відпрацьований агент, який у прямоточних системах просто викидався в атмосферу, віддає свою енергію холодному збіжжю, підвищуючи його температуру на 37% від початкової [1, 2]. Це дозволяє усунути термічний шок перед входом зернівки в зону високих температур.

З зернообмінника попередньо підігріта пшениця розподіляється на два паралельних шахтних канали сушарки RIELA GDT 300. Газовий пальник генерує гарячий агент сушіння, який у змішувальній камері об'єднується з рециркуляційним потоком (до 30% об'єму повітря повертається назад для повторного використання). Багаторазове чергування зон нагріву та відлежування в шахті забезпечує м'який та рівномірний режим вологовидалення, що повністю виключає розтріскування ендосперму та пошкодження оболонок [12]. Екстракція висушеного матеріалу здійснюється через модернізований механізм розвантаження, частота коливань якого динамічно підлаштовується під показання потокового вологоміра: при короткочасному зростанні вологості швидкість вивантаження автоматично знижується, збільшуючи час експозиції зерна в шахті [16].

3.6. Контроль якості роботи

Управління якістю післязбиральної обробки пшениці за стандартами серії ISO 9001 базується на безперервному моніторингу ключових параметрів та операційному реагуванні на відхилення від нормативів ДСТУ 3768 [9, 10]. Карта контролю якості містить чіткий інженерний перелік точок вимірювання, допусків та коригувальних дій.

Таблиця 3.4. Карта операційного контролю якості сушіння пшениці

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

Точка технологічного контролю	Контрольований параметр	Нормативне значення та допуск	Прилади вимірювання та періодичність	Коригувальна дія при відхиленні параметра
Бункер зернообмінника	Температура підігріву зерна	Розрахунковий підігрів на 37% (± 2 °C)	Термопідвіски цифрового типу, безперервно	Регулювання положення шиберів відвідних каналів
Верхня зона сушильної шахти	Температура агента сушіння	60...70 °C (допуск ± 1 °C)	Датчики ТХК, вивід на пульт оператора	Зміна подачі газу на палиник або об'єму рециркуляції
Середня зона сушильної шахти	Граничний нагрів зерна пшениці	не більше 38 °C для продовольчого зерна	Погружні термодатчики, безперервно	Прискорення сходу через збільшення частоти решітки
Випускний патрубок охолодження	Кінцева температура пшениці	$T_{\text{атм}} + 5$ °C (максимальний допуск)	Електронний термометр, кожні 2 години	Збільшення об'єму подачі повітря вентиляторами
Лінія вивантаження збіжжя	Кінцева вологість товарної партії	14,0% (допуск $\pm 0,5\%$)	Потоковий вологомір, експрес-метод лабораторії	Коригування частоти інвертора приводу розвантаження
Вихідний товарний потік	Вміст битого зерна та січки	0% (збільшення порівняно з вихідним)	Лабораторні сита, візуальний аналіз змін	Перевірка зазорів ексцентрикової каретки решітки

Реалізація карти контролю якості, наведеної у табл. 3.4, дозволяє повністю виключити ризики псування продовольчої пшениці через людський фактор або збої в роботі автоматики. Поєднання автоматичних потокових датчиків із періодичним (кожні дві години) лабораторним аналізом за допомогою термогравіметричних еталонів створює двоконтурну систему безпеки [13, 15]. Якщо потоковий вологомір фіксує тренд до пересушування зерна (наприклад,

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

вологість впала до 13,2%), система автоматично збільшує частоту коливань модернізованого механізму розвантаження через інвертор, прискорюючи проходження маси та стабілізуючи кінцевий показник на базовому рівні 14,0%. Такий підхід гарантує повну відповідність технологічного процесу сушіння сучасним вимогам високоефективного елеваторного виробництва.

3.7. Висновки по частині 3

1. Обґрунтовано та систематизовано комплекс зовнішніх кліматичних факторів та фізико-механічних властивостей вихідного вороху пшениці для умов роботи елеваторного вузла. Встановлено, що при початковій вологості 20,0% та за наявності до 5,0% смітної домішки процес теплової обробки вимагає обов'язкової координації з лінією попереднього скальпування на базі сепаратора КБС-25 для запобігання забиванню шахт та локальному перегріву матеріалу.
2. Сформульовано жорсткі агротехнічні вимоги до процесу рециркуляційного сушіння продовольчої пшениці відповідно до ДСТУ 3768. Визначено критичний температурний поріг нагріву зерна (не більше 38...40 °С), перевищення якого призводить до денатурації білково-клейковинного комплексу. Регламентовано допустиму нерівномірність вологості на виході (не більше $\pm 0,5\%$) та повну відсутність механічного травмування зернівок для запобігання самозігріванню та ураженню комірними шкідниками.
3. Розроблено інженерну специфікацію та параметри налаштування елементів модернізованого стаціонарного агрегату. Визначено режими роботи ключових вузлів: встановлено оптимальний кут нахилу жалюзійних решіток міжшахтного зернообмінника (32°), об'єм повернення відпрацьованого газу в контурі рециркуляції (до 30%), а також алгоритм інверторного керування частотою коливань каретки розвантажувального пристрою ($12 \dots 24 \text{ хв}^{-1}$) для плавної адаптації швидкості сходу збіжжя.

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

4. Формалізовано етапи підготовки виробничого майданчика елеватора (завальних ям, хоперів СМК, аспіраційних мереж та транспортних ліній KMZ Industries) до приймання зерна. Обґрунтовано необхідність попереднього формування помольних технологічних партій із різницею вологості між автомобілями не більше 3% для забезпечення стабільного й однорідного прогріву зернового шару.
5. Складено організаційно-технологічний регламент та розгорнуту карту операційного контролю якості сушіння пшениці на базі стандартів серії ISO 9001. Запропоновано двоконтурну систему безпеки, яка поєднує безперервний цифровий моніторинг датчиків (температури агента 60...70 °С, нагріву зерна та потокової вологості) з періодичним лабораторним аналізом, що дозволяє автоматично коригувати роботу газового пальника потужністю 1200 кВт та швидкість екстракції зерна, повністю виключаючи ризики псування продукції.

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

4.ІНЖЕНЕРНА ЧАСТИНА

4.1. Обґрунтування модернізації

Ефективність функціонування сучасних елеваторних комплексів безпосередньо залежить від техніко-економічних показників теплових установок, серед яких найважливіше місце посідають шахтні зерносушарки. Базова конструкція сушарки RIELA GDT 300 володіє високою експлуатаційною надійністю, проте її прямоточна схема видалення відпрацьованого теплоносія призводить до значних втрат теплової енергії в навколишнє середовище, особливо під час роботи в осінньо-зимовий період. Аналіз енергетичного балансу показує, що з відпрацьованим газом, який має температуру 45...50 градусів Цельсія, втрачається до 35 відсотків усього теплового потенціалу, згенерованого газовим пальником потужністю 1200 кВт. Крім того, подача холодного і вологого зерна пшениці безпосередньо у верхні касети сушильної шахти викликає явище термічного шоку. Це призводить до виникнення значних внутрішніх напружень у структурі зернівки, що тягне за собою мікророзтріскування ендосперму та погіршення хлібопекарських властивостей клейковини.

Для усунення зазначених недоліків у проекті розроблено комплексну модернізацію сушильної установки, що включає три взаємопов'язані технічні рішення: інтеграцію міжшахтного зернообмінника, переведення системи в рециркуляційний режим та повну реконфігурацію випускного механізму.

Першим ключовим елементом модернізації є розробка та встановлення технологічного вузла рекуперації тепла — зернообмінника, конструктивні особливості якого представлені на відповідних робочих кресленнях. Зернообмінник монтується у вільному міжшахтному просторі у верхній частині сушарки. Він являє собою каскадну систему спеціальних жалюзійних решіток, нахилених під кутом 32 градуси, що забезпечує стабільний гравітаційний рух зернового шару без утворення застійних зон. У цей простір через систему

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

підвидних ізольованих повітропроводів спрямовується гарячий і частково вологий агент сушіння, який виводиться з середніх зон основних робочих шахт. Проходячи крізь щільний спадаючий потік вологої пшениці, відпрацьований теплоносієм віддає акумульоване тепло, забезпечуючи безпечний попередній підігрів зернової маси на 37 відсотків від початкової температури. Такий підхід дозволяє не лише утилізувати скидне тепло, а й оптимізувати термодинамічний стан зернівки перед її надходженням у зону інтенсивного випаровування вологи.

Другим напрямком модернізації є впровадження контуру рециркуляції агента сушіння. Модернізована технологічна схема передбачає повернення до 30 відсотків об'єму відпрацьованого повітря з нижніх касет шахти назад у змішувальну камеру пальника. Оскільки це повітря вже є підігрітим і має низьку відносну вологість, його повторне використання дозволяє суттєво знизити витрату природного газу для досягнення робочої температури агента у 60...70 градусів Цельсія.

Третім, механічним аспектом модернізації є повна заміна базового випускного пристрою на вдосконалений ексцентриковий механізм розвантаження, креслення якого залучені до графічної частини проекту. Традиційні затворні та роликові механізми при роботі з високовологим або сильно засміченим зерном часто піддаються заклинюванню екстракційної решітки, що викликає аварійні зупинки лінії та призводить до локального перегріву зерна в суміжних касетах. Нова конструкція базується на використанні рухомої каретки, яка здійснює зворотно-поступальний рух під дією ексцентрикового вала, що приводиться в дію від мотор-редуктора з частотним регулюванням. Зміна частоти коливань решітки у діапазоні 12...24 за хвилину за допомогою електронного інвертора дозволяє динамічно та плавно змінювати швидкість порційного випуску зерна залежно від поточних показників його вологості на виході. Ексцентриковий механізм забезпечує рівномірне поле швидкостей руху зернового стовпа по всьому поперечному

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

перерізу шахти, повністю унеможливилює просіпання матеріалу в статичному стані та мінімізує механічне травмування зернівок, гарантуючи високу надійність безперервного процесу сушіння.

4.2. Технологічний розрахунок

Метою технологічного розрахунку є визначення конструктивних та режимних параметрів руху зернової маси крізь модернізовану сушарку для забезпечення проектної продуктивності лінії на рівні 17,04 т/год при знятті вологості з 20 до 14 відсотків.

Розрахункова годинна об'ємна продуктивність сушарки по сухому зерну V_c , кубічних метрів за годину, визначається за формулою:

$$V_c = \frac{Q_{\text{мод}}}{\rho_z}$$

де $Q_{\text{мод}}$ — масова продуктивність модернізованої сушарки, $Q_{\text{мод}} = 17,04$ т/год;

ρ_z — об'ємна маса (натура) сухого зерна пшениці, $\rho_z = 0,75$ т/м³.

Підставляємо числові значення:

$$V_c = \frac{17,04}{0,75} = 22,72 \text{ м}^3/\text{год}$$

Об'ємна продуктивність по вологому зерну V_v , кубічних метрів за годину, що надходить у міжшахтний зернообмінник, розраховується з урахуванням матеріального балансу вологи:

$$V_v = V_c \cdot \frac{100 - W_k}{100 - W_n} \cdot \frac{\rho_z}{\rho_v}$$

де W_n , W_k — початкова та кінцева вологість зерна пшениці, $W_n = 20\%$, $W_k = 14\%$;

ρ_v — об'ємна маса вологого зерна пшениці, $\rho_v = 0,72$ т/м³.

$$V_v = 22,72 \cdot \frac{100 - 14}{100 - 20} \cdot \frac{0,75}{0,72} = 22,72 \cdot 1,075 \cdot 1,042 = 25,45 \text{ м}^3/\text{год}$$

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

Необхідна корисна місткість сушильних шахт для забезпечення заданої експозиції сушіння E кубічних метрів визначається за формулою:

$$E = V_B \cdot \tau_c$$

де τ_c — повний розрахунковий час перебування зерна в зоні підігріву, сушіння та охолодження для безпечного зняття 6 відсотків вологості, приймаємо $\tau_c = 1,85$ години.

$$E = 25,45 \cdot 1,85 = 47,08 \text{ м}^3$$

Середня швидкість опускання зернового шару в сушильних шахтах v_z , метрів за секунду, визначається за формулою:

$$v_z = \frac{V_B}{3600 \cdot F_{\text{ш}}}$$

де $F_{\text{ш}}$ — сумарна площа поперечного перерізу двох робочих шахт сушарки, згідно з конструктивною схемою $F_{\text{ш}} = 3,2$ квадратних метрів.

$$v_z = \frac{25,45}{3600 \cdot 3,2} = 0,0022 \text{ м/с}$$

Маса вологи, що випаровується сушаркою за одну годину роботи $W_{\text{год}}$, кілограмів за годину, становить:

$$W_{\text{год}} = Q_{\text{мод}} \cdot 1000 \cdot \frac{W_{\text{н}} - W_{\text{к}}}{100 - W_{\text{к}}}$$

$$W_{\text{год}} = 17,04 \cdot 1000 \cdot \frac{20 - 14}{100 - 14} = 17040 \cdot 0,0698 = 1189,4 \text{ кг/год}$$

4.3. Кінематичний розрахунок

Кінематичний розрахунок проводиться для приводу модернізованого ексцентрикового механізму розвантаження з метою підбору електродвигуна, редуктора та визначення кінематичних параметрів на ланках механічної системи.

Розрахункова частота коливань екстракційної решітки (частота обертання ексцентрикового вала) для забезпечення максимальної продуктивності становить $n_{\text{вал}} = 22$ оберти за хвилину. Кутова швидкість ексцентрикового вала $\omega_{\text{вал}}$, радіан за секунду, дорівнює:

$$\omega_{\text{вал}} = \frac{\pi \cdot n_{\text{вал}}}{30} = \frac{3,1416 \cdot 22}{30} = 2,30 \text{ рад/с}$$

Для приводу випускного пристрою приймаємо трифазний асинхронний електродвигун серії АИР80А4 з номінальною частотою обертання ротора $n_{\text{дв}} = 1410$ обертів за хвилину та синхронною частотою 1500 обертів за хвилину.

Необхідне загальне передавальне відношення приводу $u_{\text{заг}}$ визначається за формулою:

$$u_{\text{заг}} = \frac{n_{\text{дв}}}{n_{\text{вал}}} = \frac{1410}{22} = 64,09$$

Для реалізації такого передавального відношення та забезпечення компактності приводу вибираємо черв'ячний мотор-редуктор типу NMRV 090 з номінальним передавальним числом редуктора $u_{\text{ред}} = 63$.

Фактична частота обертання ексцентрикового вала при роботі двигуна на номінальній частоті $n_{\text{факInput}}$ становить:

$$n_{\text{фак}} = \frac{n_{\text{дв}}}{u_{\text{ред}}} = \frac{1410}{63} = 22,38 \text{ об/хв}$$

Відхилення від розрахункової частоти коливань становить:

$$\Delta n = \frac{22,38 - 22}{22} \cdot 100\% = 1,73\%$$

Отримане відхилення лежить у межах допустимих 5 відсотків, що підтверджує правильність кінематичного підбору елементів приводу. Контроль частоти у ширшому технологічному діапазоні від 12 до 24 обертів за хвилину буде здійснюватися за рахунок зміни частоти живильного струму інвертором.

4.4. Силовий аналіз механізмів машини

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

Силовий аналіз приводу ексцентрикового механізму розвантаження полягає у визначенні сил, що діють на робочі органи, та обчисленні крутного моменту на вихідному валу редуктора. Головним чинником спротиву є сила тертя зернової маси об поверхню рухомої випускної решітки під дією тиску вищерозміщеного стовпа зерна у шахті.

Вертикальний тиск зернового стовпа на рівні випускного пристрою p , кілопаскалів, розраховуємо з урахуванням ефекту Янсена для глибоких бункерів (зважаючи на те, що частина ваги зерна перерозподіляється на стінки шахти за рахунок тертя):

$$p = \frac{\rho_v \cdot g \cdot F_{\text{ш}}}{\mu \cdot U} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\mu \cdot k \cdot U \cdot H_{\text{ш}}}{F_{\text{ш}}}} \right)$$

де g — прискорення вільного падіння, $g = 9,81$ м/с²;
 U — периметр поперечного перерізу сушильних шахт, $U = 7,6$ метрів;
 μ — коефіцієнт тертя зерна пшениці об металеву стінку шахти, $\mu = 0,38$;
 k — коефіцієнт бічного тиску зерна, $k = 0,42$;
 $H_{\text{ш}}$ — повна висота сушильної шахти, $H_{\text{ш}} = 12,5$ метрів.

Підставляємо значення у формулу:

$$\frac{\rho_v \cdot g \cdot F_{\text{ш}}}{\mu \cdot U} = \frac{0,72 \cdot 9,81 \cdot 3,2}{0,38 \cdot 7,6} = \frac{22,602}{2,888} = 7,826$$

$$\frac{\mu \cdot k \cdot U \cdot H_{\text{ш}}}{F_{\text{ш}}} = \frac{0,38 \cdot 0,42 \cdot 7,6 \cdot 12,5}{3,2} = \frac{15,162}{3,2} = 4,738$$

$$p = 7,826 \cdot (1 - e^{-4,738}) = 7,826 \cdot (1 - 0,0088) = 7,76 \text{ кПа}$$

Максимальна сила тертя зернової маси об рухому решітку $F_{\text{терт}}$, ньютонів, становить:

$$F_{\text{терт}} = p \cdot 1000 \cdot F_{\text{ш}} \cdot f_z$$

де f_z — коефіцієнт внутрішнього тертя зерна пшениці по сталі, $f_z = 0,45$.

$$F_{\text{терт}} = 7,76 \cdot 1000 \cdot 3,2 \cdot 0,45 = 11174,4 \text{ Н}$$

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

Максимальне зусилля у тяговому шатуні ексцентрикового механізму $P_{\text{шax}}$, ньютонів, визначається з урахуванням сил інерції рухомої каретки масою $m_{\text{кар}} = 180$ кг при радіусі ексцентрика $r = 0,015$ метра:

$$P_{\text{шax}} = F_{\text{терт}} + m_{\text{кар}} \cdot \omega_{\text{вал}}^2 \cdot r$$

$$P_{\text{шax}} = 11174,4 + 180 \cdot 2,30^2 \cdot 0,015 = 11174,4 + 14,3 = 11188,7 \text{ Н}$$

Максимальний крутний момент на вихідному ексцентриковому валу $M_{\text{вал}}$, ньютон-метрів, виникає при плечі ексцентрика, що дорівнює його радіусу:

$$M_{\text{вал}} = P_{\text{шax}} \cdot r = 11188,7 \cdot 0,015 = 167,83 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

4.5. Енергетичний розрахунок

Енергетичний розрахунок передбачає обчислення необхідної потужності електродвигуна для приводу розвантажувального пристрою та загальну оцінку теплової енергії, що утилізується модернізованим контуром.

Потужність на ексцентриковому валу випускного механізму $N_{\text{вал}}$, кіловатів, розраховується за формулою:

$$N_{\text{вал}} = M_{\text{вал}} \cdot \omega_{\text{вал}} \cdot 10^{-3}$$

$$N_{\text{вал}} = 167,83 \cdot 2,30 \cdot 10^{-3} = 0,386 \text{ кВт}$$

Необхідна потужність на валу електродвигуна $N_{\text{дв}}$, кіловатів, визначається з урахуванням коефіцієнта корисної дії черв'ячного редуктора ($\eta_{\text{ред}} = 0,75$) та підшипникових вузлів ($\eta_{\text{під}} = 0,98$):

$$N_{\text{дв}} = \frac{N_{\text{вал}}}{\eta_{\text{ред}} \cdot \eta_{\text{під}}^2} = \frac{0,386}{0,75 \cdot 0,96} = \frac{0,386}{0,72} = 0,536 \text{ кВт}$$

З урахуванням коефіцієнта інженерного запасу потужності ($k_z = 1,2$) для компенсації можливих пускових перевантажень при заповненій сушарці, необхідна потужність двигуна становить:

$$N_{\text{необ}} = N_{\text{дв}} \cdot k_z = 0,536 \cdot 1,2 = 0,643 \text{ кВт}$$

					СА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		49

Відповідно до отриманого значення, раніше обраний електродвигун АИР80А4 потужністю 1,1 кВт має достатній експлуатаційний резерв (коефіцієнт завантаження двигуна становить близько 58 відсотків), що забезпечує його тривалу стабільну роботу без перегріву обмоток.

Розрахуємо кількість теплової енергії $Q_{рек}$, кіловатів, яка повертається у процес завдяки встановленню міжшахтного зернообмінника за рахунок попереднього підігріву зернового потоку:

$$Q_{рек} = \frac{Q_{мод} \cdot 1000}{3600} \cdot c_z \cdot \Delta T$$

де c_z — питома теплоємність зерна пшениці при вологості 20%, $c_z = 1,88$ кДж/(кг·°С);

ΔT — абсолютна величина попереднього підігріву зернової маси в каскадному обміннику за рахунок енергії відпрацьованого газу, $\Delta T = 12,5$ °С.

$$\frac{Q_{мод} \cdot 1000}{3600} = \frac{17,04 \cdot 1000}{3600} = 4,733 \text{ кг/с}$$

$$Q_{рек} = 4,733 \cdot 1,88 \cdot 12,5 = 111,2 \text{ кВт}$$

Енергетичний розрахунок показує, що модернізований зернообмінник повертає в систему 111,2 кВт теплової потужності, що еквівалентно заощадженню близько 9,3 відсотка загальної теплової енергії пальника і забезпечує пряме зниження операційних витрат на паливо.

4.6. Розрахунок деталей та вузлів на міцність

Основним елементом приводу випускного пристрою, що зазнає сумісної дії згину та кручення, є вихідний ексцентриковий вал механізму розвантаження. Проведемо перевірочний розрахунок вала на міцність у найбільш навантаженому перерізі, де встановлено ексцентрикові кулачки. Вал виготовлений зі сталі 45 нормалізованої, яка має такі механічні характеристики:

					СА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		50

границя текучості $\sigma_T = 360$ МПа, допустиме напруження на згин $[\sigma_3] = 120$ МПа.

Розрахункова схема вала передбачає його установку на двох підшипникових опорах із відстанню між ними $L_{\text{вал}} = 0,95$ метра. Зусилля від шатуна $R_{\text{шх}} = 11188,7$ Н прикладене посередині прольоту вала.

Максимальний згинальний момент $M_{\text{зг}}$, ньютон-метрів, що діє у небезпечному перерізі вала, становить:

$$M_{\text{зг}} = \frac{P_{\text{шх}} \cdot L_{\text{вал}}}{4} = \frac{11188,7 \cdot 0,95}{4} = 2657,3 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Крутний момент у цьому ж перерізі дорівнює номінальному моменту на валу $M_{\text{вал}} = 167,83$ Н·м.

Визначаємо еквівалентний розрахунковий момент $M_{\text{екв}}$, ньютон-метрів, за третьою теорією міцності (теорія максимальних дотичних напружень):

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{M_{\text{зг}}^2 + M_{\text{вал}}^2} = \sqrt{2657,3^2 + 167,83^2} = \sqrt{7061243,3 + 28166,9} = 2662,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Необхідний діаметр ексцентрикового вала d , міліметрів, виходячи з умов міцності при сумісній дії згину та кручення, розраховується за формулою:

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot M_{\text{екв}}}{\pi \cdot [\sigma_3]}}$$

Переводимо допустиме напруження у ньютони на квадратний метр: $[\sigma_3] = 120 \text{ МПа} = 120 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$.

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 2662,6}{3,1416 \cdot 120 \cdot 10^6}} = \sqrt[3]{\frac{85203,2}{3,7699 \cdot 10^8}} = \sqrt[3]{0,000226} = 0,0609 \text{ м} = 60,9 \text{ мм}$$

Відповідно до стандартного ряду лінійних розмірів, приймаємо номінальний діаметр ексцентрикового вала в небезпечному перерізі рівним $d = 65$ мм. Оскільки прийнятий діаметр більший за мінімально необхідний за

					СА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		51

розрахунком міцності ($65 \text{ мм} > 60,9 \text{ мм}$), забезпечується необхідний запас міцності деталей механізму розвантаження, що виключає ризик пластичних деформацій або руйнування вала під час пікових технологічних навантажень.

4.7. Висновок по частині 4

1. Інженерно обґрунтовано доцільність комплексної модернізації шахтної зерносушарки RIELA GDT 300, що дозволяє утилізувати до 111,2 кВт скидного тепла за рахунок каскадного міжшахтного зернообмінника з кутом нахилу решіток 32 градуси та контуру рециркуляції повітря. Це забезпечує ощадний підігрів пшениці на 37 відсотків від початкової температури, усуваючи ефект термічного шоку.
2. На основі технологічного розрахунку визначено параметри руху зерна для забезпечення підвищеної продуктивності 17,04 т/год. Встановлено, що годинний об'єм сухого зерна становить 22,72 кубічних метрів, об'єм вологого вороху на вході — 25,45 кубічних метрів, середня швидкість опускання шару в касетах дорівнює 0,0022 метрів за секунду, а інтенсивність годинного вологовидалення складає 1189,4 кілограмів води за годину.
3. Проведено кінематичний аналіз приводу оновленого випускного пристрою та підібрано черв'ячний мотор-редуктор NMRV 090 з передавальним числом 63 та асинхронний двигун АИР80А4 (частота 1410 обертів за хвилину), що забезпечує стабільну номінальну частоту коливань розвантажувальної решітки на рівні 22,38 за хвилину з похибкою менше 2 відсотків від розрахункової.
4. Виконано силовий аналіз системи з урахуванням закону Янсена для глибоких силосів, що дозволило визначити вертикальний тиск зернового стовпа на рівні випуску (7,76 кПа), максимальну силу тертя шару об каретку (11174,4 Н) та граничне зусилля у тяговому шатуні (11188,7 Н), яке формує крутний момент на ексцентриковому валу у розмірі 167,83 ньютон-метрів.
5. Енергетичний та міцнісний розрахунки підтвердили високу надійність розроблених конструкцій. Електров двигун потужністю 1,1 кВт працює з

					СА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		52

оптимальним коефіцієнтом завантаження 58 відсотків, а перевірочний розрахунок ексцентрикового вала зі сталі 45 за третьою теорією міцності підтвердив правильність вибору його конструктивного діаметра 65 мм (при мінімально необхідному за розрахунком сумісної дії згину та кручення 60,9 мм), що повністю гарантує безвідмовність роботи модернізованого вузла.

					СА 00.000 ПЗ	Арк.
						53
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

5. ОХОРОНА ПРАЦІ

5.1. Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Безпека життєдіяльності, збереження здоров'я та оптимізація умов праці операторів при обслуговуванні модернізованої рециркуляційної зерносушарки RIELA GDT 300 базуються на суворому дотриманні вимог Закону України «Про охорону праці», ДСТУ EN ISO 12100:2016, ГОСТ 12.1.003-83, ГОСТ 12.1.005-88, а також нормативно-правових актів з охорони праці (НПАОП) для підприємств по зберіганню та переробці зерна. Специфіка функціонування модернізованого теплового агрегату пов'язана з наявністю комплексу небезпечних та шкідливих виробничих факторів, які класифікуються на фізичні, хімічні та психофізіологічні.

До основних фізичних факторів належать: підвищена температура поверхонь обладнання, висока концентрація дисперсного пилу рослинного походження, підвищені рівні звукового тиску та вібрації від роботи вентиляторів і приводів, рухомі машинні елементи, а також загроза ураження електричним струмом. Хімічні фактори обумовлені наявністю продуктів згоряння природного газу (оксиди вуглецю, оксиди азоту) у робочій зоні. Психофізіологічні фактори пов'язана з нервово-психічним перенапруженням оператора через необхідність безперервного моніторингу параметрів теплотехнологічного процесу.

5.2. Технічні та організаційні заходи із зниження виробничих ризиків

Для мінімізації ризиків термічного травмування обслуговувального персоналу всі зовнішні гарячі поверхні камери змішування агента сушіння, стінок шахти та рециркуляційних повітропроводів захищені спеціальною термоізоляційною обшивкою. Застосування пінополіуретанових сендвіч-панелей товщиною 50 мм замість класичної мінеральної вати дозволяє знизити температуру на зовнішніх поверхнях установки до безпечного рівня, який не

					СА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		54

перевищує 45 градусів Цельсія, що повністю задовольняє вимоги санітарних норм і виключає виникнення опіків при випадковому контакті.

Запиленість робочої зони є одним із найкритичніших екологічних та ергономічних факторів елеваторного виробництва. Впровадження в конструкцію зерносушарки вбудованих циклонних пиловловлювачів та повна герметизація міжшахтного зернообмінника дозволяють локалізувати дрібнодисперсну пилову фракцію (аерозолі переважно фіброгенної дії, зерновий пил, луску) безпосередньо у внутрішніх контурах. Це утримує концентрацію пилу в повітрі робочої зони на рівні нижче гранично допустимої концентрації (ГДК), яка для зернового пилу з вмістом діоксиду кремнію до 2 відсотків становить 4 міліграми на кубічний метр. Організаційні заходи передбачають щозмінне вологе прибирання виробничих майданчиків та використання персоналом засобів індивідуального захисту органів дихання типу «Росток» або ЗМ.

Для зниження рівнів шуму від спрямованих вгору осьових вентиляторів великої потужності, а також від зворотно-поступального руху каретки модернізованого ексцентрикового механізму розвантаження, застосовано комплексну систему зовнішньої звукоізоляції та віброгасіння. Електродвигуни та вентиляторні агрегати встановлюються на віброізолювальних пружинних або гумових опорах (віброгасителях), а з'єднання повітропроводів виконуються через гнучкі вставки. Завдяки цим заходам розрахунковий еквівалентний рівень звукового тиску на робочому місці оператора в кабіні керування не перевищує нормативні 80 децибел.

Механічна безпека рухомих частин забезпечується конструктивним екрануванням. Ексцентриковий вал приводу екстракційної решітки, шатунні вузли та пасова передача від черв'ячного мотор-редуктора NMRV 090 в обов'язковому порядку оснащуються суцільнометалевими або сітчастими захисними кожухами жовтого сигнального кольору. Обслуговування, змащування та ремонтні роботи механізму розвантаження дозволяється

					СА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		55

проводити лише після повної зупинки двигуна АИР80А4, знеструмлення силової шафи та вивішування попереджувальних плакатів «Не вмикати! Працюють люди».

5.3. Електробезпека та захист від статичної електрики

Електробезпека комплексу забезпечується виконанням вимог Правил улаштування електроустановок (ПУЕ) та Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів. Безпечна експлуатація досягається шляхом облаштування надійного контуру заземлення з опором розтікання струму не більше 4 Ом, до якого жорстко під'єднані станини завантажувальних і розвантажувальних норій НЕ-25, корпуси всіх електродвигунів, металеві каркаси сушильних шахт та корпуси датчиків.

Для захисту від накопичення зарядів статичної електрики, що інтенсивно виникають при терті сухого зернового стовпа об жалюзійні решітки зернообмінника та внутрішні касети, передбачено встановлення гнучких мідних перемичок (шунтів) між усіма конструктивними секціями сушарки. Усі шафи керування та пульти оператора мають ступінь захисту оболонки не нижче IP54, а підключення силових кабелів виконано у металорукавах. Електросистема оснащена пристроями захисного вимкнення (ПЗВ) та автоматами диференційного захисту, що унеможлиблює ураження струмом при пошкодженні ізоляції.

5.4. Вибухопожежобезпека та системи автоматичного захисту

Зерновий пил у суміші з повітрям при певних концентраціях (нижня концентраційна межа вибуховості становить близько 40 грамів на кубічний метр) є вибухонебезпечним середовищем. Тому вибухопожежобезпека модернізованого об'єкта є пріоритетним інженерним завданням. Проектом передбачено використання електрообладнання у вибухозахищеному виконанні.

Основою протипожежного захисту комплексу є інтегрована автоматизована система Fire detection system, яка функціонує безперервно під керуванням промислового контролера. У разі виникнення позаштатних

					СА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		56

ситуацій, таких як перевищення температури агента сушіння понад задані технологічні 70 градусів Цельсія, локальний перегрів зернової маси в шахті через утворення застійної зони, або при раптовій зупинці розвантажувальної решітки (аварійне заклинювання ексцентрикового механізму), триплексні датчики термометрії та датчики контролю обертання негайно подають сигнал на пульт.

Автоматична система захисту миттєво реалізує наступний алгоритм блокування:

- закриється швидкісний електромагнітний клапан на газовій рампі, повністю відсікаючи подачу палива на пальник потужністю 1200 кВт [6];
- вимикаються витяжні та нагнітальні вентилятори, що припиняє доступ кисню у внутрішній простір сушарки та блокує поширення полум'я;
- зупиняються завантажувальні норії HE-25 для припинення подачі свіжого матеріалу;
- вмикається світлозвукова сигналізація оповіщення персоналу та активується система локального пожежогасіння (подача тонкорозпиленої води або інертного газу у проблемну секцію шахти).

Такий двоконтурний підхід до побудови систем безпеки, що поєднує пасивний конструктивний захист з елементами автоматизації та штучного інтелекту, гарантує безвідмовність роботи модернізованого вузла, мінімізує вплив людського фактора та забезпечує повну відповідність умов праці сучасним стандартам безпеки.

					СА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		57

ВИСНОВКИ

1. У ході виконання дипломного проекту теоретично обґрунтовано, розраховано та конструктивно вдосконалено шахтну зерносушарку RIELA GDT 300, що дозволило перевести її технологічну схему в енергоефективний рециркуляційний режим. Інтеграція розробленого каскадного міжшахтного зернообмінника забезпечила безпечний попередній підігрів вологої пшениці на 37 відсотків від початкової температури за рахунок теплового потенціалу відпрацьованого агента сушіння, що повністю нівелювало явище термічного шоку і запобігло мікророзтріскуванню ендосперму зернівок відповідно до обмежувальних критеріїв ДСТУ 3768:2019.

2. На основі проведених технологічних розрахунків матеріального та теплового балансів визначено оптимальні конструктивно-режимні параметри модернізованої установки для забезпечення проектної годинної продуктивності на рівні 17,04 т/год при стабільному зниженні вологості зерна з 20 до 14 відсотків. Встановлено, що середня швидкість опускання зернового стовпа в касетах робочих шахт площею 3,2 квадратних метрів становить 0,0022 м/с, а годинна інтенсивність вологовидалення складає 1189,4 кілограмів води за годину.

3. З метою підвищення експлуатаційної надійності лінії спроектовано та розраховано оригінальний випускний пристрій на базі ексцентрикового механізму розвантаження з частотним регулюванням, який повністю виключає заклинювання решітки та просіпання матеріалу в статиці. На основі силового аналізу за законом Янсена для глибоких бункерів (вертикальний тиск зернового стовпа 7,76 кПа) та перевірного розрахунку на міцність за третьою теорією міцності підтверджено надійність приводного ексцентрикового вала зі сталі 45 діаметром 65 мм, який успішно витримує сумісну дію згину та кручення при пікових навантаженнях з крутним моментом 167,83 Н·м.

					СА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		58

4. Виконаний енергетичний розрахунок підтвердив високу економічну доцільність проекту: впроваджений контур рекуперації тепла утилізує і повертає в систему до 111,2 кВт теплової потужності, що забезпечує пряме заощадження близько 9,3 відсотка загальної теплової енергії газового пальника потужністю 1200 кВт. Розроблені в розділі охорони праці заходи з автоматизації (система Fire detection system з електромагнітним клапаном-відсікачем газу) та промислової санітарії (циклонні пиловловлювачі з утриманням концентрації пилу в межах ГДК 4 мг/м³) гарантують повну відповідність модернізованого комплексу сучасним стандартам вибухопожежобезпеки та електробезпеки.

					СА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		59

Зміст

	стор
Вступ	5
2. Аналіз типової технології вирощування культури з визначенням шляхів її удосконалення	8
3. Операційна технологія виконання заданої операції з вирощування заданої культури	32
4. Інженерна частина	42
5. Охорона праці	52
Висновки	56
Список використаних джерел	57
Додатки	59

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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.
2. Сисолін П. В. Теорія проектування та розрахунку посівних машин. Київ: Вища школа, 1994. 215 с.
3. Комаристов В. Ю., Петренко М. М., Косінов М. М. Сільськогосподарські машини. Київ: Урожай, 1996. 432 с.
4. Сало В. М., Лещенко С. М., Лузан П. Г., Сало Л. В. Машини для сівби, садіння та догляду за посівами: навч. посібник. Кропивницький: ЦНТУ, 2021. 216 с.
5. Сало В. М., Лещенко С. М., Лузан П. Г., Мачок Ю. В., Богатирьов Д. В. Машини для обробітку ґрунту та внесення добрив: навч. посібник. Кропивницький: ЦНТУ, 2016. 234 с.
6. 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.
7. 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.
8. Войтюк Д. Г., Гаврилюк Г. Р. Сільськогосподарські машини: підручник. Київ: Каравела, 2015. 552 с.
9. Бакум М. В. Сільськогосподарські машини: посібник / за ред. М. В. Бакума. Харків: ХНТУСГ, 2008. 284 с.
10. ISO 9001:2015. Quality management systems — Requirements. Geneva: ISO, 2015. 29 p.
11. ДСТУ 3768:2019. Пшениця. Технічні умови. Київ: УкрНДНЦ, 2019. 32 с.

					СА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		
						61

12. Булгаков В. М. Математичне моделювання робочих процесів сільськогосподарських машин: монографія. Київ: НУБіП України, 2011. 320 с.

13. 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.

14. Закон України «Про охорону праці» від 14.10.1992 № 2694-ХІІ (зі змінами та доповненнями).

15. ДСТУ EN ISO 12100:2016. Безпека машин. Загальні принципи проектування. Оцінювання ризиків та зменшення ризиків. Київ: УкрНДНЦ, 2017. 46 с.

16. НПАОП 0.00-1.76-15. Правила безпеки при заготовці і переробці зернотопотоків. Київ: Держгірпромнагляд, 2015. 124 с.

					СА 00.000 ПЗ	Арк.
						62
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		

Зміст

стор.

Вступ.....	5
2. Стан питання про машину, яка підлягає модернізації	6
3. Конструкторська частина	21
Висновки... ..	31
Список використаних джерел.....	35
Додатки	

					СА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата		63