

Центральноукраїнський національний технічний університет

ЦЗДО

Кафедра сільськогосподарського машинобудування

“Допущено до захисту”

Зав. кафедрою СГМ

к.т.н., професор

\_\_\_\_\_Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2025 р.

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

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

«Удосконалення сушарки шахтного типу з обґрунтуванням  
параметрів сушильної камери та механізму екстракційної решітки»

Виконав здобувач вищої освіти II курсу,

групи ГМ-23МЗ-1

ОНП «Галузеве машинобудування»

спеціальності 133 «Галузеве

машинобудування»

\_\_\_\_\_Гордуз Віталій Віталійович

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Керівник роботи

доцент, канд. техн. наук

\_\_\_\_\_Дмитро БОГАТИРЬОВ

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Рецензент

професор, докт. техн. наук

\_\_\_\_\_Микола МОРОЗ

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

м. Кропивницький

**Центральноукраїнський національний технічний університет**

Факультет Агротехнологічний

Кафедра Сільськогосподарського машинобудування

Рівень вищої освіти магістр

Галузь знань 13 механічна інженерія

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування

Освітньо-наукова програма ОНП 133 Галузеве машинобудування

“Допущено до захисту”

Зав. кафедрою СГМ

к.т.н., професор

\_\_\_\_\_ **Олексій ВАСИЛЬКОВСЬКИЙ**

“ \_\_\_ “ \_\_\_\_\_ 2025 р.

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

**Гордуз Віталій Віталійович**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Удосконалення сушарки шахтного типу з обґрунтуванням параметрів сушильної камери та механізму екстракційної решітки
2. Керівник роботи Богатирьов Дмитро Володимирович, к.т.н., доц.  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
3. Строк подання роботи до захисту 10.05.2025 р.
4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності сушіння за рахунок застосування попереднього прогрівання зерна, зміною режиму роботи сушарки та приводу екстракційної решітки для зменшення енерговитрат, підвищення надійності та якості виконання технологічного процесу

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1-5	Богатирьов Д.В., доцент, к.т.н.		

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розробка та оформлення частин на основі матеріалів, зібраних під час переддипломних практик	05.03.2025 р.	
2.	Проведення необхідних розрахунків та оформлення «Наукова частина»	18.03.2025 р.	
3.	Проведення необхідних розрахунків та оформлення розділу «Інженерна частина»	21.04.2025 р.	
4.	Проведення необхідних розрахунків та оформлення розділів «Охорона праця», «Економічна частина», графічної частини роботи.	15.04.2025 р.	
5.	Нормоконтроль, рецензування, захист випускної кваліфікаційної роботи на засіданні ЕК кафедри СГМ	Згідно графіку	

Дата видачі завдання  
«10» березня 2025 р.

Підпис керівника \_\_\_\_\_

Д.В. Богатирьов  
(прізвище та ініціали)

Завдання прийнято до виконання  
«10» березня 2025 р.

Підпис здобувача \_\_\_\_\_

В.В. Гордуз  
(прізвище та ініціали)





## ВСТУП

У процесі збирання зернових культур формується неоднорідна за складом зернова маса, яка містить значну кількість сторонніх домішок органічного та мінерального походження. Особливо небажаними є залишки листя і стебел бур'янів, які характеризуються підвищеним вмістом вологи. Такий підвищений рівень вологості обумовлює нестійкість зібраного зерна під час зберігання: вже через 1–2 доби можуть активізуватися гідролітичні процеси, що призводить до зниження якості зернової маси та втрати частини врожаю.

Найбільш нестійкою до зберігання є зернова маса, отримана шляхом прямого комбайнування. Навіть у разі збору відносно сухого зерна у ній наявні травмовані, деформовані, щуплі зерна, а також значна кількість органічного пилу, що додатково погіршує її збереженість. Тому після збирання зерно повинно якнайшвидше пройти післязбиральну обробку.

Післязбиральна доробка включає низку технологічних операцій, вибір і послідовність яких визначаються фізіологічним станом зерна, його призначенням, сортовими особливостями та культурною належністю. До основних операцій належать: первинне розміщення зернової маси, очищення від домішок, фракційне сортування, сушіння, провітрювання, а за необхідності — охолодження.

На етапі первинного розміщення зерно, що надходить із зернозбиральної техніки, сортується за культурою, сортом, категорією відтворення та якісними показниками. Особливої уваги потребує зерно високоякісних сортів: твердої пшениці, пивоварного ячменю, а також посівного матеріалу, якість якого має перебувати під постійним технологічним контролем. Дефектне зерно —

					<i>ДСА 00.000 ПЗ</i>		
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>	<i>Гордцз</i>				<i>Пояснювальна записка</i>		
<i>Перевір.</i>	<i>Богатирьов</i>						
<i>Н.контр.</i>	<i>Мачак</i>						
<i>Затв.</i>	<i>Васильковський</i>						
					<i>Літ.</i>	<i>Аркцш</i>	<i>Аркцшів</i>
					<i>ЦНТУ, зр. ГМ-23М3-1</i>		

уражене фузаріозом, сажкою, комахами-шкідниками, проросле або із стороннім запахом — виділяється в окремі технологічні потоки.

Оцінка вологості зернової маси є ключовим критерієм при визначенні подальшої технології її обробки. Залежно від рівня вологості зерно класифікується наступним чином: до 14–15% — сухе, придатне до тривалого зберігання; 15–17% — вологе, потребує активного провітрювання або досушування; понад 17% — сире, вимагає термінового сушіння. У разі неможливості оперативного сушіння сирого зерна, його розміщують в установках активної вентиляції з обов'язковим моніторингом температурно-вологісного режиму.

Однією з ключових технологічних операцій, що забезпечує збереження врожаю та стабільність його якісних показників, є сушіння зерна. Саме на цьому етапі відбувається зниження вологості зернової маси до нормативних значень, що забезпечує її біологічну стійкість, уповільнення мікробіологічних процесів та пригнічення розвитку шкідників. Вибір типу сушарки, її конструктивних та технологічних параметрів відіграє визначальну роль у досягненні високої ефективності сушіння при мінімальних витратах енергії.

Серед різноманіття конструкцій зерносушарок шахтні сушарки займають провідне місце в агропромисловому комплексі завдяки своїй надійності, енергоефективності та здатності забезпечити рівномірне сушіння великого обсягу зерна. Їх робота базується на принципі безперервного руху зернової маси крізь вертикальну шахту, де зерно поступово проходить зону нагрівання та охолодження. Завдяки відсутності активних механічних впливів у процесі сушіння зменшується травмування зерна, що особливо важливо при роботі з посівним матеріалом та продовольчим зерном високої якості.

Шахтні сушарки характеризуються відносно невисокими питомими енерговитратами, стабільною продуктивністю та широким діапазоном регулювання режимів сушіння. Їх конструктивна простота забезпечує високу ремонтпридатність і надійність експлуатації навіть у складних польових

					<i>ДСА 00.000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис.</i>	<i>Дата</i>		6

умовах. Разом із тим, для досягнення оптимального технологічного ефекту необхідним є ретельний підбір та обґрунтування основних параметрів сушарки залежно від типу культури, початкової вологості зерна, погодних умов та виробничих потреб господарства.

Таким чином, удосконалення процесів післязбиральної обробки зернових культур, зокрема за рахунок раціонального використання шахтних зерносушарок, становить актуальне науково-прикладне завдання, спрямоване на підвищення енергоефективності, збереження якості врожаю та забезпечення продовольчої безпеки.

Метою дослідження є підвищення ефективності процесу післязбирального сушіння аграрної продукції шляхом обґрунтування та удосконалення технологічних і конструктивних параметрів шахтної зерносушарки для забезпечення зниження енерговитрат, збереження якості зерна та стабільності його технологічних властивостей при зберіганні.

Об'єктом дослідження є процес післязбиральної обробки зернової маси, зокрема сушіння сільськогосподарських культур у шахтних зерносушарках.

Предметом дослідження є закономірності впливу конструктивно-технологічних параметрів шахтної зерносушарки на рівномірність сушіння, енергоефективність процесу та збереження якісних показників зернової продукції.

Наукова новизна дослідження полягає в удосконаленні технологічного процесу сушіння зернових культур шляхом встановлення оптимальних режимів теплової обробки у шахтній зерносушарці з урахуванням початкової вологості, фізико-механічних властивостей зерна та умов експлуатації, що дозволяє зменшити питомі витрати теплової енергії та знизити рівень травмування зерна.

					<i>ДСА 00.000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис.</i>	<i>Дата</i>		7

## 2. Інженерна частина

### 2.1. Загальна характеристика:

Зерносушарка А1-ДСП-50 — це шахтна сушарка періодичної або безперервної дії, призначена для сушіння зернових, зернобобових і олійних культур. Вона широко застосовується в сільськогосподарських підприємствах для післязбирального обробітку зерна. Основна мета — доведення вологості зерна до кондиційних значень, що забезпечують його тривале зберігання або подальшу переробку. Сушарка має вертикальну шахту, в якій зерно рухається самопливом. Повітря подається через отвори у стінках шахти, проходячи через шар зерна і відбираючи надлишкову вологу. Обігрів повітря здійснюється за допомогою теплообмінника або безпосередньо – в залежності від модифікації.

Таблиця 2.1.

#### Технічні характеристики (типові):

Параметр	Значення
Продуктивність при сушінні пшениці з 20% до 14% вологості	до 50 т/год (залежно від культури)
Тип сушарки	Шахтна, прямотокова
Вид теплоносія	Гаряче повітря (вода, газ, дизель)
Температура теплоносія	до 150–160 °С
Висота сушильної шахти	~8–10 м
Питома витрата палива	~1,5–2,5 кг умовного палива/т на 1% зниження вологості
Тип циркуляції	Безрециркуляційна
Система охолодження	Вбудована, за допомогою атмосферного повітря
Електроспоживання	20–40 кВт

Основні вузли: завантажувальний бункер; шахта сушіння з осередками розвантаження; пальник або теплообмінник (газовий або твердопаливний варіант); вентилятори гарячого та холодного повітря; охолоджувальний відсік; розвантажувальний пристрій; система контролю температури та вологості.

#### Переваги:

- Надійна і проста конструкція;
- Висока продуктивність при невеликому енергоспоживанні;

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

- Можливість роботи на різних видах палива (газ, дизель, тверде паливо);
- Плавне регулювання режимів сушіння;
- Відносно низькі капітальні витрати порівняно з імпортними аналогами;
- Адаптованість до українських умов експлуатації.

Недоліки:

- Обмежені можливості автоматизації (в базовій комплектації);
- Менша точність підтримки температурного режиму порівняно з сучасними рециркуляційними сушарками;

A1-ДСП-50 є оптимальним вибором для середніх та великих господарств, які потребують ефективного сушіння зерна пшениці, кукурудзи, ячменю, сої, соняшника тощо. Особливо актуальна при масовому збиранні врожаю та потребі швидкої підготовки зерна до зберігання.

Сушарка A1-ДСП-50 побудована за принципом шахтного сушіння, що передбачає вертикальне переміщення зернової маси гравітаційним способом крізь багат шарову сушильну камеру. Вентилятори високої продуктивності забезпечують подачу і рівномірний розподіл термодинамічно обробленого повітря, нагрітого до температури 140–160 °С, що проходить крізь шар зерна. Такий контакт забезпечує інтенсивний теплообмін і масообмін вологістю із зерновою масою.

Система теплопостачання реалізована через газові або дизельні пальники, оснащені системами автоматичного регулювання температурного режиму та безпеки експлуатації. В окремих модифікаціях застосовується твердопаливний котел із додатковою системою автоматичного подавання палива.

Основні компоненти сушарки: Завантажувальний приймальний бункер із системою рівномірного розподілу зерна по поверхні сушильної шахти; Сушильна шахта з розташованими в кілька ярусів сітчастими решітками, які

					<i>ДСА 00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		9

забезпечують рівномірний повітряний потік і виключають конвекційні мертві зони;

Пальниковий агрегат із автоматизованою системою подачі та регулювання горіння; Вентиляторний вузол з регульованою продуктивністю для оптимізації аеродинамічних параметрів; Охолоджувальна секція з використанням атмосферного повітря для стабілізації температурних параметрів готового продукту; Система контролю і регулювання технологічних параметрів (температури, вологості, витрати повітря) з можливістю підключення до АСУТП.

Принцип роботи: Зернова маса, подана у верхню частину шахти, гравітаційно спускається вниз через сушильний канал, у той час як гаряче повітря, продувається вентилятором крізь шар зерна у зустрічному напрямку (протитечія) або прямому, в залежності від конструктивної модифікації. Процес масообміну супроводжується інтенсивним випаровуванням вологи із зерна, що супроводжується стабільним підтриманням температурного поля завдяки системі автоматичного контролю.

Після сушіння зерно проходить через охолоджувальну секцію, де температура продукту знижується до безпечного рівня, що попереджає термічне ушкодження зернової оболонки і покращує його зберігання.

Переваги зерносушарки А1-ДСП-50:

Високий рівень продуктивності при оптимальних показниках питомої енергоємності;

Модульність конструкції, що дозволяє адаптувати сушарку під різні види культур та параметри сировини;

Розвинена система теплового контролю, що запобігає локальному перегріванню зерна;

					<i>ДСА 00.000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис.</i>	<i>Дата</i>		10

Надійність і довговічність вузлів, зменшення простоїв завдяки простоті конструкції;

Гнучкість паливної бази — можливість використання різноманітних видів палива;

Відповідність екологічним нормам щодо викидів і енергоспоживання.

Недоліки та обмеження:

Обмежена глибина автоматизації у базовій комплектації, що потребує додаткових інвестицій для інтеграції з сучасними АСУТП;

Менша ефективність енергозбереження порівняно з рециркуляційними сушарками із замкнутим циклом;

Відносна складність у налаштуванні режимів при сушінні зернових культур із високою чутливістю до термічного впливу (наприклад, пивоварний ячмінь, насіння льону).

На сучасному ринку зерносушарок модель А1-ДСП-50 конкурує із сушарками як вітчизняного, так і закордонного виробництва. Основні аналоги:

Сушарка ЗСП-15-50 (Україна): також шахтного типу, продуктивність близько 40–50 т/год. Відрізняється підвищеним ступенем автоматизації та більш сучасною системою контролю параметрів.

Сушарки компанії GSI (США), модель 50 tph Tower Dryer: закордонний аналог з високим рівнем автоматизації, енергозбереження та сучасними системами безпеки, однак значно дорожчий за А1-ДСП-50.

Sukup Tower Dryer (США): пропонує подібний шахтний принцип сушіння, але з удосконаленими системами рециркуляції повітря, що дозволяє зменшити витрати палива та покращити екологічні показники.

Зерносушарка А1-ДСП-50 — це надійний і перевірений у вітчизняних агротехнологічних умовах комплекс, який забезпечує високу продуктивність і

					ДСА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		11

якість сушіння зерна, адаптований до варіативної паливної бази та простий в експлуатації. Незважаючи на деякі недоліки у сфері автоматизації, її технічні характеристики та економічна ефективність роблять її конкурентоспроможною серед аналогічних моделей середнього класу.

Технічні рекомендації щодо оптимізації роботи зерносушарки А1-ДСП-50

1. Оптимізація теплового режиму сушіння. Підбір температурного профілю нагрітого повітря із урахуванням сорту та початкової вологості зерна. Рекомендується застосовувати багатоступеневу регуляцію температури, що дозволить уникнути термічного ушкодження зернової оболонки, збереження фізико-хімічних властивостей зерна та запобігання розвитку ферментативної активності, що може впливати на якість продукту. Використання системи автоматичного контролю температури із датчиками, розташованими в різних точках сушильної шахти, для забезпечення рівномірності теплового поля. Запровадження PID-регуляторів для точного підтримання заданих параметрів.

2. Раціоналізація аеродинамічних режимів. Регулювання продуктивності вентиляторів залежно від вологості зерна та інтенсивності сушіння для оптимізації витрат енергії та зниження механічного зносу обладнання. Періодичний моніторинг перепаду тиску в сушильній шахті для визначення стану сітчастих решіток і чистоти повітропроводів. Засмічення викликає нерівномірний повітряний потік та локальне перегрівання.

3. Підвищення енергоефективності. Впровадження рекупераційних систем для використання відпрацьованого гарячого повітря в якості переднагрітого повітря, що подається у палиниковий агрегат. Це дозволить зменшити питомі витрати палива. Застосування теплоізоляційних матеріалів на зовнішніх поверхнях сушарки для зниження тепловтрат. Використання частотно-регульованих приводів вентиляторів, що дозволяє адаптувати оберти двигунів під мінімально необхідний рівень продуктивності.

					ДСА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		12

4. Автоматизація процесу сушіння. Впровадження комплексної системи автоматичного регулювання технологічних параметрів з можливістю дистанційного моніторингу та управління через SCADA-систему. Це дозволить оперативно реагувати на зміни параметрів сировини та навколишнього середовища. Встановлення датчиків вологості на вході та виході зернової маси для контролю реального зниження вологісного показника в режимі реального часу.

5. Оптимізація режимів подачі зерна. Забезпечення рівномірного розподілу зерна у завантажувальному бункері за допомогою механізмів розподілення, що запобігає утворенню нерівномірних шарів і сприяє однорідному сушінню. Регулювання швидкості проходження зерна через сушильну шахту з урахуванням поточного рівня вологості та сорту зерна.

6. Технічне обслуговування та профілактика. Регулярне очищення сушильної шахти та вентиляційних каналів від пилу, луски та інших забруднень для підтримки оптимального повітряного потоку. Профілактичний контроль та заміна зношених решіток, ущільнень та інших критичних вузлів для запобігання втрат тепла і механічних пошкоджень зерна. Періодична калібрування датчиків та контрольних приладів.

7. Використання адаптивних методів сушіння. Застосування багатофакторного аналізу та моделювання процесу сушіння з метою підбору оптимальних параметрів для різних видів зерна, що дозволяє максимально зберегти його фізіологічну цілісність та поживні властивості. Використання імпульсного або періодичного режиму подачі гарячого повітря для зниження теплового стресу зерна.

Впровадження зазначених технічних рекомендацій сприятиме підвищенню енергоефективності сушарки А1-ДСП-50, зменшенню експлуатаційних витрат, підвищенню якості сушіння та збереженню фізико-хімічних властивостей зерна, що у свою чергу забезпечить

					ДСА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		13

## Порівняльна таблиця основних технічних характеристик зерносушарок

Параметр	А1-ДСП-50 (Україна)	ЗС-25 (Україна)	GSI 10T (США)	Westrup 50 (Німеччина)	ST-40 (Чехія)	HN-30 (Китай)	ZPX-45 (Польща)	Sical 55 (Франція)	JB-35 (Індія)	Simbria 40 (Італія)	Jacto 30 (Бразилія)	Batco 50 (Канада)	Yanmar 25 (Японія)	Stallarholm 40 (Швеція)	Tarsus 35 (Туреччина)	Daesung 45 (Корея)
Продуктивність, т/год	50	25	40	50	40	30	45	55	35	40	30	50	25	40	35	45
Спосіб сушіння	шахтна	шахтна	шахтна	шахтна	шахтна	шахтна	шахтна	шахтна	шахтна	шахтна	шахтна	шахтна	шахтна	шахтна	шахтна	шахтна
Тип палива	дизель/газ	дизель	газ/дизель	газ/дизель	дизель	газ/дизель	дизель	дизель	дизель	дизель	дизель	дизель	дизель	дизель	дизель	дизель
Потужність вентиляторів, кВт	22	18	25	30	22	20	22	25	18	22	20	25	18	22	20	25
Витрати палива, л/год	30	28	27	25	29	32	30	28	31	26	29	27	28	29	31	26
Об'єм бункера, т	5	3	4	5	4	3,5	4,5	5	3,5	4	3,5	5	3,5	4	3,5	4
Система контролю	Автоматична	Частково	Автоматична	Автоматична	Частково	Частково	Автоматична	Автоматична	Частково	Автоматична	Частково	Автоматична	Частково	Автоматична	Частково	Автоматична
Маса, кг	4500	3000	4000	4700	3900	3500	4200	4600	3200	4000	3500	4700	3000	3900	3200	4300
Рівень автоматизації	Високий	Середній	Високий	Високий	Середній	Середній	Високий	Високий	Середній	Високий	Середній	Високий	Середній	Високий	Середній	Високий
Орієнтовна ціна, тис. \$	55	35	60	70	40	30	45	65	32	62	35	68	33	64	34	66

ДСА 00.000 ПЗ

Арк.

Зм. Арк. № докум. Підпис. Дата

14

Провівши аналіз конструкцій та моделей зерносушарок схожих за принципом роботи з А1-ДСП-50 зроблено наступні висновки.

ua 1. А1-ДСП-50 (Україна). Найоптимальніший варіант у співвідношенні ціна-якість. Добре адаптована до умов Центральної України, доступна сервісна підтримка та запчастини. Рекомендується для фермерських господарств середнього та великого рівня.

us 2. GSI 10T (США). Високий рівень автоматизації, надійність, хороша енергоефективність. Ідеальний для господарств із стабільним електропостачанням. Мінус – висока ціна та складність із сервісом.

de 3. Westrup 50 (Німеччина). Преміум-клас. Надійна, енергоощадна, довговічна. Має сенс для великих господарств, які готові інвестувати у довготривалий результат. Потребує кваліфікованого персоналу.

cz 4. STROJÍRNA ST-40 (Чехія). Простий та ремонтпридатний агрегат. Хороший варіант для середніх господарств. Підходить для умов регіону, хоча має меншу продуктивність.

cn 5. Hengan HN-30 (Китай). Бюджетне рішення. Підходить для малих та середніх господарств. Слід зважати на нижчу якість збірки та матеріалів. Рекомендовано як тимчасове або резервне рішення.

pl 6. ZPX-45 (Польща). Сучасна, технологічна, з гарною сервісною підтримкою. Підходить для середніх та великих господарств. Варто розглядати як пріоритетний варіант.

fr 7. Sical 55 (Франція). Високопродуктивна сушарка. Актуальна для агрохолдингів або господарств з великою кількістю кукурудзи та соняшнику. Мінус – висока вартість володіння.

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

ІН 8. Jay Bharat JB-35 (Індія). Простий і недорогий апарат. Підходить для фермерів із обмеженим бюджетом, але не розрахований на великі обсяги сушіння. Хороший як стартова модель.

ІТ 9. Cimbria 40 (Італія). Енергозбереження, точне управління, висока якість. Підходить для технологічно розвинених підприємств. Рекомендований для високоякісного зерна.

СА 10. Watco 50 (Канада). Сучасна, ефективна, витривала. Складніша у сервісному обслуговуванні. Підходить для агрофірм з великим валовим обсягом сушіння.

ЈР 11. Yanmar 25 (Японія). Високотехнологічна, енергоефективна, малошумна. Ідеальна для високовартісних культур на малій площі. Недолік – імпорт запчастин.

СЕ 12. Stallarholm 40 (Швеція). Екологічна, енергоощадна сушарка з якісною автоматикою. Висока вартість компенсується тривалим строком служби.

TR 13. Tarsus 35 (Туреччина). Збалансована за ціною і якістю. Оптимальна для малих та середніх господарств. Проста в обслуговуванні. Актуальний варіант заміни ЗС-25.

KR 14. Daesung 45 (Південна Корея). Сучасна техніка з точним контролем параметрів. Підходить для середніх і великих господарств. Потребує якісного електроживлення.

FR 15. Sical 30 (Франція). Компактна, мобільна, зручна для невеликих фермерських господарств. Альтернатива для невеликих площ.

					<i>ДСА 00.000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис.</i>	<i>Дата</i>		16



Узагальний висновок:

◆ Для середніх господарств Кіровоградської області доцільно використовувати моделі:

- А1-ДСП-50 (Україна),
- ZPX-45 (Польща),
- GSI 10T (США),
- STROJIRNA ST-40 (Чехія).

◆ Для великих господарств або агрохолдингів:

- Westrup 50 (Німеччина),
- Batco 50 (Канада),
- Cimbria 40 (Італія).

◆ Для невеликих фермерів з обмеженим бюджетом:

- Henan HN-30 (Китай),
- Jay Bharat JB-35 (Індія),
- Tarsus 35 (Туреччина),
- Sical 30 (Франція).

## 2.2. Технологічні розрахунки

Теплотехнічний аналіз зерносушарки для основних сільськогосподарських культур—пшениці, соняшнику, сої та жита—з урахуванням їхніх фізико-хімічних властивостей. Розрахунок наведено у додатку А. Результат розрахунку (рис. 2.1) дав змогу зробити наступні висновки:

- Соняшник: Має найвищі теплові витрати через значну кількість вологи, що видаляється, та специфічну структуру насіння.

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

- Соя: Вимагає обережного сушіння через чутливість до температури та ризик пошкодження насіння.
- Пшениця та жито: Мають схожі теплові характеристики, з помірними витратами енергії на сушіння.

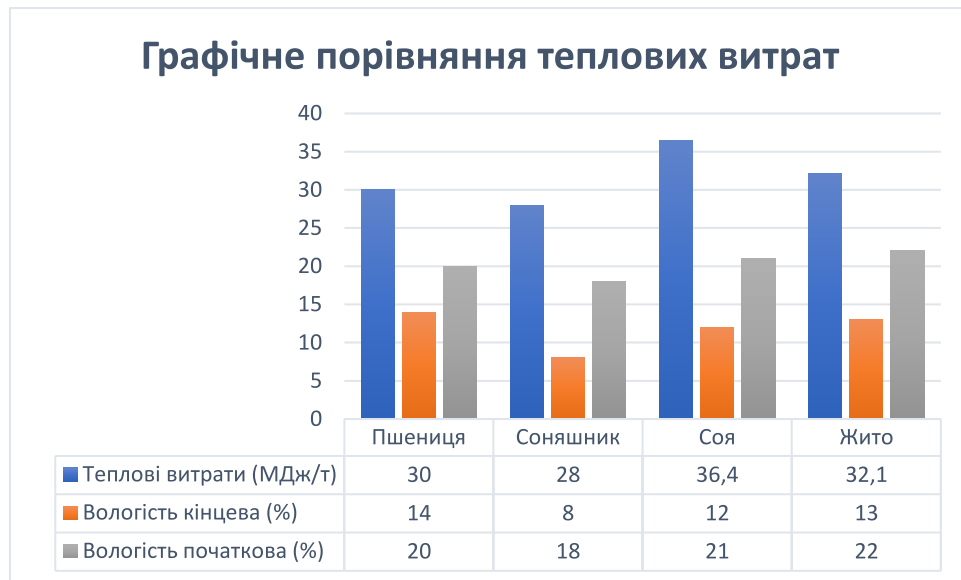


Рис. Графічне порівняння теплових витрат

### 2.3. Кінематичні, силові та розрахунки деталей на міцність

Об'єкт вдосконалення. У структурно-функціональному ядрі зерносушильного апарата інтегровано просторово-орієнтований жорсткий рамний металоконструктив, до внутрішньої площини якого за допомогою дугового зварювання фіксується система внутрішніх розсікачів. Дані елементи, виготовлені з конструкційної вуглецевої сталі товщиною  $\delta = 8$  мм, формують щільні випускні канали каліброваної геометрії шириною  $b = 90$  мм, що функціонують як регульовані тракти виходу зернової маси із зони теплової обробки.

Нижній модульний елемент конструкції, який виконує функції динамічного розвантаження зерна, представлений мобільною несучою рамою,

що за технологічною номенклатурою класифікується як екстракційна решітка. Вона реалізована у вигляді двокомпонентної конструкції із двох синхронізовано зв'язаних сегментів, що об'єднані між собою прецизійно підігнаними з'єднувальними пластинами (поличками). Несуча структура виготовлена з гарячекатаної смугової сталі товщиною  $\delta = 16$  мм, що гарантує необхідну жорсткість, стійкість до деформацій і вібрацій під дією статичних і динамічних навантажень.

Кінематична опора екстракційної решітки реалізована через чотири пари обкатних опорно-напрямних роликів, які контактують із напрямними пластинами довжиною  $l = 300$  мм і товщиною  $\delta = 60$  мм. Технологічна змінність конструкції дозволяє варіювати зазор між рухомою та стаціонарною рамами, змінюючи кількість регульовальних пластин. Це забезпечує адаптивне налаштування продуктивності агрегата під конкретні характеристики зернового матеріалу.

Повернення екстракційної решітки у вихідну позицію після завершення розвантажувального циклу здійснюється завдяки дії двох бокових циліндричних пружних елементів стискання, розташованих симетрично відносно вертикальної осі конструкції. Вони забезпечують зворотне переміщення шляхом вивільнення акумульованої потенційної енергії пружинної деформації.

Геометрія поличок вибирається із розрахунку критичної ширини, що унеможливує самовільне просипання зерна в закритому положенні, з урахуванням коефіцієнта внутрішнього тертя зернової маси, кута природного укусу та питомого тиску на площину решітки.

Нормативний зазор між верхнім (нерухомим) і нижнім (рухомим) модулями становить  $s = 3...5$  мм, що забезпечує оптимальне співвідношення між ефективністю вивантаження та запобіганням втратам теплової енергії в результаті паразитної інфільтрації повітря через неконтрольовані канали.

					ДСА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		20



інтервал між відкриттями затвора перевищує 60 секунд, зерно тривалий час знаходиться в стані нерухомості на нагрітих поверхнях коробів, що може викликати деградацію його якості.

Зерносушарка оснащена випускним механізмом періодичної дії (див. рис. 2.2), який має низку експлуатаційних недоліків, виявлених у процесі роботи.

Оскільки для першого контуру випускний механізм буде замінено на клапан, проектування нового механізму слід виконувати лише для другого контуру.

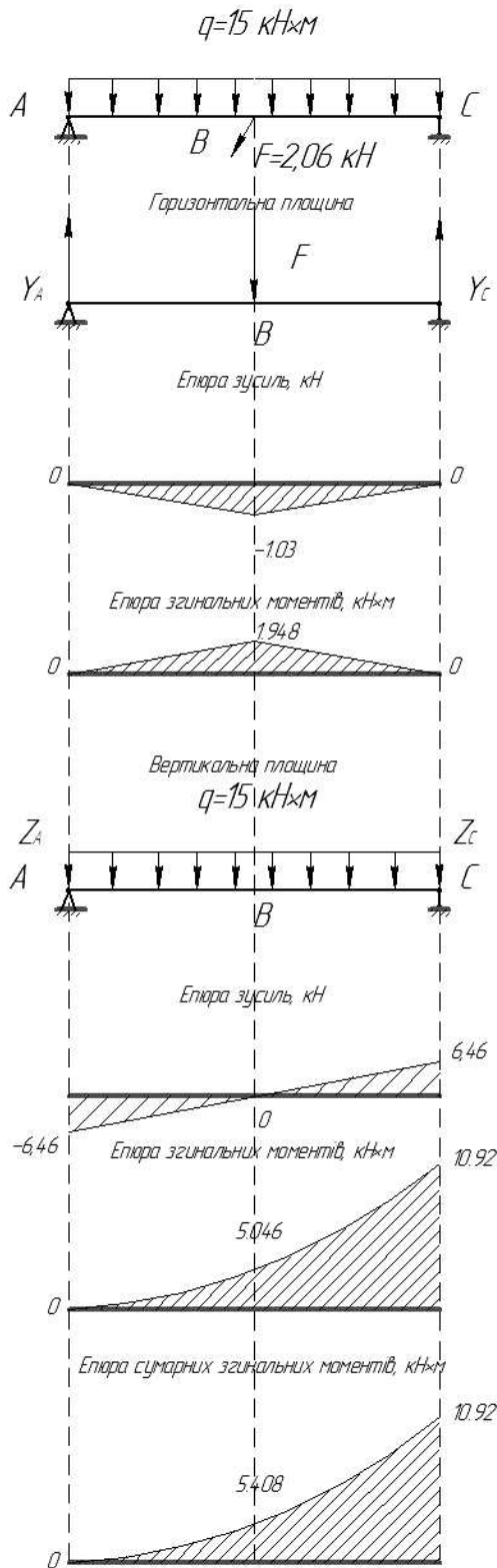
Рухома рама 4 встановлена на ролики 2, які переміщуються по напрямних нерухомої рами. Ролики виготовлені у вигляді сталевих дисків, які встановлені на сталевих осях вільною посадкою, при цьому підшипники відсутні. Внаслідок експлуатації було встановлено, що ці ролики потребують регулярного змащення через кожні 2400 годин роботи при паспортному навантаженні зерносушильного агрегату. Для усунення цього недоліку рекомендується впровадження закритих кулькових підшипників типу 60000 згідно з вимогами ДСТУ ISO 4922:2015, які характеризуються ресурсом служби до 480 000 годин.

Привід механізму реалізовано через вертикальну тягу 8 довжиною 2,65 м, що обумовлено конструктивними особливостями. Для оптимізації довжини тяги та підвищення компактності конструкції пропонується розмістити механізм приводу вище ексцентрика 7. Внаслідок зміни осьових навантажень необхідно провести заміну пружини 1 на деталь з відповідними параметрами для забезпечення надійності і довговічності експлуатації.

Запропоновані заходи модернізації дозволять, за умови мінімальних капіталовкладень, підвищити продуктивність зерносушарки та знизити питомі витрати дизельного палива і електроенергії, одночасно зберігаючи належний рівень якості оброблюваного зерна.

					<i>ДСА 00.000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис.</i>	<i>Дата</i>		22

### 2.4.1. Розрахунок осі під підшипник.



Розглядаємо зусилля в горизонтальній площині.

Значення реакцій

$$Y_A = Y_C = \frac{1}{2} \cdot F = \frac{1}{2} \cdot 2,06 = 1,03 \text{ кН}$$

Ділянка  $0 \leq x \leq \frac{L}{2}$  ( $L=1,16 \text{ м}$ )

зусилля

$$Q_A = Y_A;$$

$$Q_B = Y_A - F = 1,03 - 2,06 = -1,03 \text{ кН.}$$

згинаючі моменти

$$M_y = Q_y \cdot x$$

$$M_A = 0; \quad M_B = Y_A \cdot \frac{L}{2} = 1,03 \cdot \frac{1,16}{2} = 1,948$$

кН.м

Ділянка  $\frac{L}{2} \leq x \leq L$  ( $L=1,16 \text{ м}$ )

зусилля

$$Q_B = Y_A - F;$$

$$Q_C = Y_A - F + Y_C = 1,03 - 2,06 + 1,03 = 0 \text{ кН.}$$

згинаючі моменти

$$M_y = Q_y \cdot x$$

$$M_c = 0;$$

Розглядаємо зусилля в вертикальній площині.

Значення реакцій

$$Z_A = Z_C = q \cdot \frac{L}{2} = 15 \cdot \frac{1,16}{2} = 6,46 \text{ кН}$$

Ділянка  $0 \leq x \leq \frac{L}{2}$  ( $L=1,16$  м)

зусилля

$$Q_A = Z_A; Q_B = Z_A - \frac{L}{2} \cdot q = 6,46 - 6,46 = 0 \text{ кН.}$$

згинаючі моменти

$$M_z = Q_z \cdot x$$

$$M_A = 0; M_B = Z_A \cdot L \cdot \frac{L}{2} = 1,03 \cdot 1,16 \cdot \frac{1,16}{2} = 5,046 \text{ кН.м}$$

Ділянка  $\frac{L}{2} \leq x \leq L$  ( $L=1,16$  м)

зусилля

$$Q_B = Z_A - q \cdot \frac{L}{2};$$

$$Q_C = Z_A - q \cdot \frac{L}{2} + Z_C = 6,46 - 6,46 + 6,46 = 6,46 \text{ кН}$$

згинаючі моменти

$$M_z = Q_z \cdot x$$

$$M_C = 10,92 \text{ кН.м;}$$

Сумарні згинальні моменти

$$M_\Sigma = \sqrt{M_y^2 + M_z^2}$$

$$M_{\Sigma AB} = 5,408 \text{ кН.м; } M_{\Sigma AC} = 10,92 \text{ кН.м}$$

Визначаємо розрахункові діаметри в характерних точках

$$d_c = \sqrt[3]{\frac{M_\Sigma}{0,1 \cdot [\sigma_{-1}]}} = \sqrt[3]{\frac{10,92}{0,1 \cdot 40}} = 39 \text{ мм}$$

					<i>ДСА 00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		24

Приймаємо діаметр підшипник 40 мм.

### 2.4.3. Вибір підшипника

За заданих навантажень:

- радіальне  $F_r = 17,4$  кН,
- осьове  $F_a = 2,06$  кН,
- частота обертання  $n = 900$  об/хв,
- необхідна довговічність  $L_h = 10\,000$  год,

визначаємо відношення навантажень:

$$\frac{F_a}{F_r} = 0,118 < e = 0,221,$$

тому еквівалентне навантаження обчислюється за формулою:

$$P = XF_r + YF_a = 0,56 \times 17,4 + 1,15 \times 2,06 = 12,11 \text{ кН.}$$

Тривалість служби підшипника у мільйонах обертів визначається як:

$$L_{10} = \frac{10^6}{60n} \times L_h = 185,19 \text{ млн обертів.}$$

Визначаємо необхідну динамічну вантажопідйомність:

$$C = P \times L_{10}^{1/3} = 12,11 \times 5,68 = 68,8 \text{ кН.}$$

Типові кулькові підшипники серії 8100 мають динамічну вантажопідйомність в межах 10–17 кН, що недостатньо для заданих параметрів.

					<i>ДСА 00.000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис.</i>	<i>Дата</i>		25

## Рекомендовані варіанти підшипників

Модель	Тип підшипника	Динамічна вантажопідйомність С, кН	Примітки
8108	Кульковий закритий	16,8	Недостатньо для заданої довговічності
30206	Конічний роликовий	~74	Відповідає вимогам по вантажопідйомності і довговічності
30306	Циліндричний роликовий	~80	Альтернатива з підвищеною вантажопідйомністю

Конічні роликові підшипники серії 30200 характеризуються підвищеною здатністю сприймати осьові та радіальні навантаження, що забезпечує високу довговічність навіть при інтенсивній експлуатації.

Для забезпечення надійної роботи випускного механізму зерносушарки з урахуванням заданих навантажень і ресурсу рекомендується застосувати роликові конічні підшипники типу 30206 або циліндричні роликові підшипники 30306. Вони мають достатню вантажопідйомність, що гарантує довготривалу безперебійну роботу.

За потреби можемо підготувати детальний технічний опис із характеристиками обраних моделей і рекомендаціями по монтажу та обслуговуванню.

## 2.5. Розрахунок витрат палива сушаркою А1-ДП50 для різних зернових культур

Для визначення витрат дизельного палива на сушіння культур пшениці, соняшника, жита та сої за допомогою зерносушарки типу А1-ДП50 використаємо базові параметри та технічні характеристики обладнання.

						<i>ДСА 00.000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис.</i>	<i>Дата</i>			26



## Визначення теплової енергії для випаровування вологи

Приблизна теплота пароутворення вологи приймається рівною  $L = 2450$  кДж/кг.

Теплова енергія для випаровування:

$$Q = m_v \times 1000 \times L \quad (\text{кДж}),$$

де  $m_v$  в кг.

Культура	Q, кДж/т зерна
Пшениця	102 250
Соняшник	50 000
Жито	156 310
Соя	50 000

### Розрахунок витрат палива

ККД пальника (дизельного пальника) приймаємо  $\eta = 0,85$ , теплота згоряння дизельного палива  $q = 43\,000$  кДж/кг, густина дизельного палива —  $\rho = 0,85$  кг/л.

Необхідна кількість палива на тонну сушіння:

$$V = \frac{Q}{\eta \times q \times \rho} \quad (\text{л/т}),$$

Культура	V, л/т зерна	Вартість палива, грн/т
Пшениця	3,53	183,56
Соняшник	1,73	89,96
Жито	5,48	285,04
Соя	1,73	89,96

За розрахунками, найбільші витрати палива на сушіння припадають на жито через високу вологість, що видаляється, а найменші — на соняшник та сою. Використання зерносушарки А1-ДП50 дозволяє ефективно сушити зерно

з оптимальними енергетичними витратами, що позитивно впливає на собівартість продукції.

### 3. Наукова частина

Зерносушарка А1-ДСП-50Е є модернізованою версією попередньої моделі ДСП-32, що характеризується підвищеною продуктивністю та розширеною функціональністю, що забезпечує її широке впровадження в елеваторній промисловості. Цей агрегат належить до безперервних зерносушильних установок відкритого типу та призначений для ефективного сушіння широкого спектру зернових, зернобобових культур та олійного насіння.

Автоматизована система керування контролює основні технологічні параметри та роботу ключових вузлів сушарки, забезпечуючи стабільний процес сушіння. Важливою особливістю є інтегрована система очищення сушильного агента від пилу та легких домішок, що підвищує якість кінцевого продукту та надійність експлуатації.

Модель А1-ДСП-50Е відрізняється від базової версії А1-ДСП-50 удосконаленим конструктивним виконанням: застосовано оцинкований корпус із підвищеним терміном служби, вдосконалено герметизацію секцій для забезпечення ефективного сушіння високочутливих культур, таких як ріпак, покращено теплоізоляцію та додано три додаткові сушильні секції, що сприяє підвищенню продуктивності. Крім того, для оптимізації процесу охолодження зерна встановлено додатковий осьовий вентилятор.

Агрегат здатен функціонувати як на газоподібному паливі, так і на повітряно-топкових газових сумішах, що підвищує його універсальність і економічність. Конструктивно сушарка складається із двох спарених вертикальних шахт, виготовлених з металевих секцій, а також включає шафу

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

керування, тепловологообмінник, охолоджувач, вентилятори, випускні механізми, надсушильні бункери, норії та топковий блок.

Габаритні розміри шахт становлять 13 275 мм у висоту, 3 770 мм у ширину та 1 200 мм у глибину. Перша сушильна зона має висоту 4 700 мм, друга — 3 000 мм, а зона охолодження — 4 700 мм. Камера нагрівання містить 38 рядів коробів, зона охолодження — 19 рядів. Непарні ряди мають по 19 коробів, парні — по 18 коробів та 2 півкороби, що дозволяє оптимізувати товщину зернового шару, підданого продуванню, і таким чином покращує тепло- та масообмінні процеси.

Важливою технологічною особливістю є змішування сушильного агента з нагрітим повітрям із зони охолодження, що сприяє значній економії палива і електроенергії.

Топка обладнана комплексом автоматичних засобів контролю, які забезпечують підтримання стабільного тиску перед форсункою, автоматичне запалювання палива при запуску сушарки та аварійне відключення подачі палива у разі гасіння факела. Конструктивно топка складається з двох камер і оснащена двома циклонами для уловлювання іскор, а також камерою змішування з регульованою заслінкою для контролю подачі повітря.

Сировина, накопичена в оперативному буфері, змішується з підсушеним та нагрітим зерном із другої сушильної шахти, після чого направляється в надсушильний буфер і далі у першу сушильну шахту та тепловологообмінник. По другій норії зерно подається у надсушильний бункер другої шахти, проходячи сушильну та охолоджуючу зони.

Процес сушіння включає три етапи контролю температури та вологості, за результатами яких зерно направляється на досушування або до вихідної зони. Випускні механізми, що працюють за періодичним принципом, забезпечують дозоване вивантаження висушеного та охолодженого зерна, яке через норію потрапляє в накопичувальний буфер або безпосередньо у зерносклад.

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

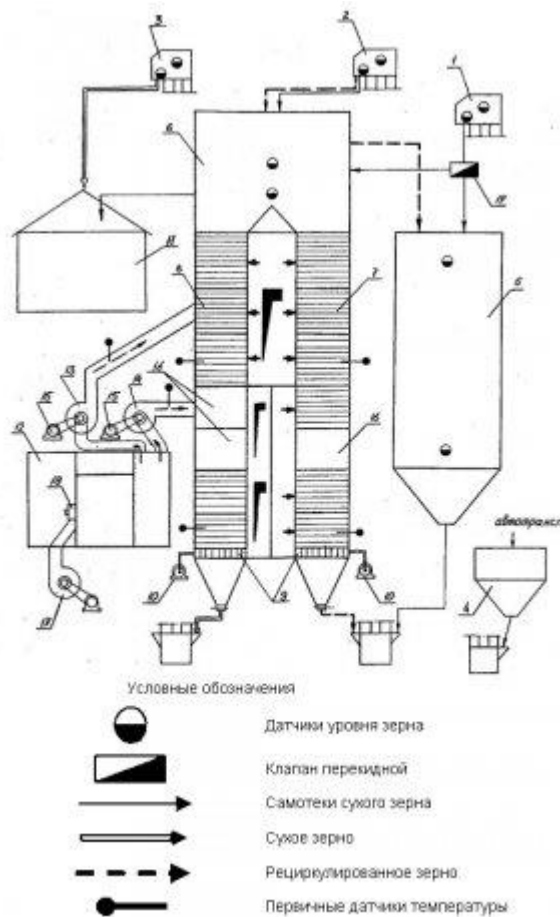


Рис. 3.1. Технологічна схема зерносушарки А1-ДСП-50Е з позначенням основних функціональних вузлів:

- 1 – норія для транспортування вологого зерна
- 2 – рециркуляційна норія, що забезпечує повторну подачу зерна
- 3 – норія для вивантаження висушеного зерна
- 4 – приймальний бункер для вологого зерна
- 5 – накопичувальний бункер для вологого зерна
- 6 – надсушительний бункер для додаткового досушування
- 7 – рециркуляційна шахта зерносушарки
- 8 – шахта остаточного сушіння
- 9 – випускні механізми зерна
- 10 – електроприводи, що керують випускними механізмами
- 11 – бункер або склад для зберігання сухого зерна
- 12 – топка зерносушарки
- 13 – вентилятор першої сушильної зони ц4-70 №10
- 14 – вентилятор другої сушильної зони ц4-70 №10
- 15 – електроприводи вентиляторів
- 16 – зона контролю параметрів зерна
- 17 – вентилятор подачі повітря до форсунки

18 – форсунка типу ф-1

19 – перекидний клапан із ручним керуванням пк-15

У разі, якщо надсушильний буфер порожній, вентиляційні установки сушильної камери автоматично вимикаються. Обладнання зерносушарки функціонує за заблокованою схемою управління, що передбачає зупинку всіх взаємопов'язаних механізмів при зупинці будь-якого рухомого вузла. Автоматизована система керування забезпечує оптимальний режим роботи технологічного процесу сушіння, що сприяє раціональному використанню енергетичних ресурсів та мінімізації впливу людського фактора на експлуатацію агрегату. Для моніторингу залишкової вологості зерна застосовується вологомір, розташований у шахті остаточного сушіння. Контроль температурних параметрів теплоносія, а також нагрітої і охолодженої сировини здійснюється за допомогою первинних датчиків, встановлених у зонах із максимальними та мінімальними температурними значеннями. У приміщенні перед топковою камерою розміщено пульт дистанційного керування, що дозволяє оператору здійснювати ручний контроль за параметрами роботи зерносушарки. Під наглядом перебувають такі вузли: транспортне обладнання, вентиляційні системи, положення та рівень зерна в зерносушарці, а також у бункерах вологого та сухого зерна. Крім того, у шафі управління встановлено вторинний температурний датчик для забезпечення дубльованого контролю температури в критичних точках технологічного процесу.

Основні технічні характеристики зерносушарки А1-ДП-50Е:

1. Планова продуктивність при зниженні вологості зерна з 20% до 14% — 50 т/год;
2. Питома витрата електроенергії на 1 тону зернових — 2,2 кВт·год;
3. Витрата дизельного палива на зниження вологості на 1% для 1 тону зернових — 1,2 кг;
4. Витрата природного газу на зниження вологості на 1% для 1 тону зернових — 1,73 м<sup>3</sup>.

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

### 3.2. Шляхи удосконалення зерносушарки

У рециркуляційних зерносушильних агрегатах критичною технологічною характеристикою є величина зниження вологості зернової маси за один цикл сушіння, що безпосередньо визначає значення коефіцієнта циркуляції зерна. Із зменшенням амплітуди осушення за цикл спостерігається зростання коефіцієнта рециркуляції, що означає збільшення кількості зерна, яке багаторазово проходить через сушильний контур із моменту запуску агрегату. Така динаміка призводить до зниження ефективної пропускної здатності сушарки та подовження середнього часу перебування зерна в сушильному апараті. Підвищена рециркуляція зерна негативно впливає на його фізико-механічну цілісність, зокрема, на структурну цілісність плодової оболонки, що може погіршувати якість кінцевого продукту. З огляду на це, для оптимізації процесу сушіння в рециркуляційних системах доцільно максимізувати величину вологості, що видаляється за один технологічний цикл, що сприятиме зниженню коефіцієнта рециркуляції та покращенню технологічної продуктивності. Актуальна технологія сушіння у рециркуляційних зерносушарках базується на інтенсивному видаленні вологи в рециркуляційному каналі за допомогою обдуву насіння атмосферним повітрям із заданими параметрами температури та вологості. Внаслідок цього відбувається охолодження зернової маси на виході з рециркуляційного каналу, що зумовлює необхідність додаткового енергозатратного підігріву зерна для наступного сушіння. Така технологічна особливість призводить до зниження питомого зниження вологості за цикл, що, своєю чергою, збільшує коефіцієнт рециркуляції зерна і сприяє зростанню енерговитрат та збільшенню часу перебування матеріалу в сушарці. Інноваційним рішенням є впровадження рециркуляційно-ізотермічного режиму сушіння, суть якого полягає у заміні атмосферного повітря на спеціально кондиціонований осушувач із контрольованою температурою та відносною вологістю. Така заміна підвищує

					ДСА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		33

парціальний тиск водяної пари в зоні сушіння та стимулює інтенсивність дифузійних процесів вологообміну всередині зерна, що призводить до більш ефективного видалення вологи за одиницю часу. Внаслідок цього зменшується кількість циклів рециркуляції, а температура зерна на виході із рециркуляційної шахти практично не відрізняється від вхідної температури, що усуває потребу у додатковому енергетичному підігріві. Таким чином, впровадження рециркуляційно-ізотермічного режиму дозволяє оптимізувати термодинамічний та масообмінний баланс сушіння, підвищити енергетичну ефективність агрегату, зменшити механічне пошкодження зерна та підвищити загальну продуктивність зерносушарки.

У рециркуляційних зерносушильних системах ключовим технологічним параметром є ступінь зниження вологості зерна за один цикл сушіння, який визначає інтенсивність вологообмінних процесів та безпосередньо впливає на коефіцієнт циркуляції зерна  $K_c$ . Коефіцієнт циркуляції визначається як відношення кількості зерна, що циркулює в сушильному контурі, до кількості зерна, що надходить на сушіння за одиницю часу, тобто:

$$K_c = \frac{m_{rec}}{m_{in}},$$

де  $m_{rec}$  — маса рециркульованого зерна,  $m_{in}$  — маса зерна, що подається в сушарку.

Зі збільшенням величини зниження вологості за цикл сушіння  $\Delta W$  відбувається зростання  $K_c$ , що свідчить про збільшення кількості проходів зерна через сушильний контур, що, у свою чергу, призводить до подовження середнього часу сушіння  $t_{avg}$ , що можна описати як:

$$t_{avg} = K_c \cdot t_{cycle},$$

де  $t_{cycle}$  — час проходження одного циклу сушіння.

Збільшення часу сушіння негативно позначається на продуктивності агрегату  $P$ , яка зворотно пропорційна часу сушіння, та може бути виражена як:

$$P = \frac{m_{in}}{t_{avg}} = \frac{m_{in}}{K_c \cdot t_{cycle}}$$

Крім того, повторна циркуляція зерна у сушильному апараті збільшує механічне навантаження на поверхню зерна, що може спричинити мікроскопічні пошкодження плодової оболонки через механічний знос, зниження фізико-механічної міцності та, відповідно, погіршення якісних характеристик кінцевого продукту.

Традиційна технологія сушіння в рециркуляційних агрегатах передбачає обдування зерна атмосферним повітрям, параметри якого задаються температурою  $T_{atm}$  та відносною вологістю  $\phi_{atm}$ . У рециркуляційному каналі відбувається активне випаровування вологи з поверхні зерна, але охолодження маси зерна за рахунок теплової інерції повітряного потоку призводить до пониження температури зерна на виході з каналу  $T_{out} < T_{in}$ . Для підтримання необхідного режиму сушіння виникає потреба у додатковому тепловому впливі, що зумовлює підвищені енергозатрати.

Це явище можна описати через баланс тепла сушіння, де тепловий потік на випаровування вологи  $Q_{evap}$  залежить від різниці ентальпій повітря на вході та виході, а теплові втрати  $Q_{loss}$  на підігрів зерна визначаються як:

$$Q_{evap} = m_{air} \cdot (i_{in} - i_{out}), \quad Q_{loss} = m_{grain} \cdot c_p \cdot (T_{in} - T_{out}),$$

де  $m_{air}$  — масовий потік повітря,  $i_{in}$  та  $i_{out}$  — ентальпії повітря на вході та виході,  $m_{grain}$  — маса зерна,  $c_p$  — питома теплоємність зерна.

Для підвищення ефективності сушіння впроваджується рециркуляційно-ізотермічний режим, суть якого полягає у використанні осушеного повітря із регульованими параметрами температури  $T_{rec}$  та відносної вологості  $\phi_{rec}$  замість атмосферного. Це дозволяє підвищити парціальний тиск водяної пари  $p_v$  у повітрі та інтенсифікувати дифузійні процеси випаровування вологи з зерна.

Вологовидалення описується законом Фіка для дифузії:

					<i>ДСА 00.000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис.</i>	<i>Дата</i>		35

$$J = -D_{\text{eff}} \cdot \frac{\partial C}{\partial x},$$

де  $J$  — потік вологи,  $D_{\text{eff}}$  — ефективний коефіцієнт дифузії вологи у зерні,  $C$  — концентрація вологи,  $x$  — координата.

Застосування осушувача підвищує  $D_{\text{eff}}$  через підвищення градієнта парціального тиску вологи між зерном і повітрям, що призводить до збільшення питомої швидкості масопереносу  $\dot{m}_w$ :

$$\dot{m}_w = k_c \cdot A \cdot (p_{v,\text{grain}} - p_{v,\text{air}}),$$

де  $k_c$  — коефіцієнт масообміну,  $A$  — поверхня контакту.

Як наслідок, зменшується кількість необхідних циклів рециркуляції, знижується коефіцієнт циркуляції, а температура зерна на виході із рециркуляційної шахти  $T_{\text{out}} \approx T_{\text{in}}$ , що дозволяє виключити додаткові енергозатрати на підігрів зерна.

Таким чином, рециркуляційно-ізотермічний режим сушіння забезпечує оптимальний термодинамічний баланс і підвищує енергоефективність зерносушарки, знижує негативний вплив механічного стресу на зернову масу, покращує якість сушіння та підвищує пропускну здатність обладнання.

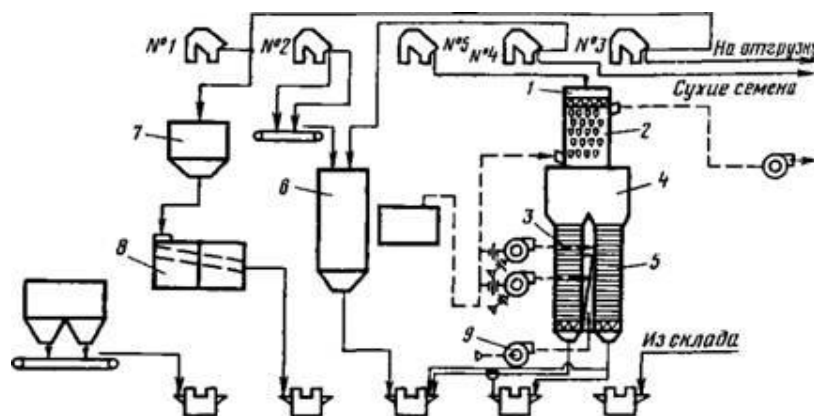


Рис. 3.2. Технологічна схема сушіння зерна;

1 – бункер над камерою нагрівання; 2 камера нагріву; 3 - рециркуляційна шахта; 4 - тепловологобмінник; 5 - шахта охолодження; 6 - оперативний бункер; 7 - бункер; 8 - сепаратор; 9 - вентилятор.

Зерносушильний агрегат функціонує за складною технологічною схемою, що забезпечує оптимальний тепломасообмінний процес сушіння пшениці. Сире зерно пшениці перед подачею до сушарки проходить очистку у сепараторі (поз. 8, рис. 3.2), який здійснює розділення та видалення домішок для підвищення якості подальшої обробки. Очищене зерно за допомогою норії (поз. 2) із продуктивністю 100 т/год транспортується до оперативного бункера (поз. 6). Звідси зерно надходить у рециркуляційну норію (поз. 5) з підвищеною продуктивністю 350 т/год, куди одночасно подаються рециркулюючі зернові потоки із шахти рециркуляції (поз. 3). Подальший етап включає подачу гомогенної зернової суміші в накопичувальний бункер (поз. 1) та надалі у камеру нагрівання (поз. 2), де зерно контактує з сушильним агентом — нагрітим повітрям, що подається вентиляторами. В даному технологічному циклі відбувається інтенсивний теплообмін між зерном та сушильним агентом, що регулюється параметрами температури і вологості повітря. Нагріте зерно спрямовується в тепловологобмінник (поз. 4), де реалізується рекуперація вологи шляхом перерозподілу масової концентрації вологи між сирими та рециркулюючими (сухими) зернами. Така термодинамічна взаємодія забезпечує енергетичну ефективність процесу сушіння. Після тепловологобмінника зерновий потік поділяється на два потоки, що направляються в рециркуляційну шахту (поз. 3) та шахту остаточного охолодження (поз. 5). Ключова особливість застосованої схеми — перехід на рециркуляційно-ізотермічний метод сушіння, який реалізується шляхом демонтажу перегородки між другою та третьою зонами напірної камери. Їх ділять по діагоналі теплоізолюючою перегородкою, що розділяє камеру на дві ізольовані термодинамічні зони. У першу зону шахти остаточного охолодження та у всі зони рециркуляційної шахти подається сушильний агент із топки.

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

Температура агента сушіння регулюється шляхом підсмоктування атмосферного повітря, що дозволяє підтримувати стабільний ізотермічний режим із максимальною інтенсивністю масообміну і мінімальними енергетичними втратами. Другу і третю зони шахти остаточного охолодження обслуговує вентилятор (поз. 9), що забезпечує підтримання необхідного аеродинамічного режиму. Просушене зерно, що виходить із шахти остаточного охолодження, транспортується норією (поз. 4) до складу сухого зерна. У випадку недосушеності зерна його повертають до накопичувального бункера (поз. 1) для повторного циклу сушіння.

#### Технічні виклики та шляхи підвищення продуктивності сушіння

Одним із найважливіших етапів зберігання зерна є забезпечення його відповідного рівня вологості. Багато підприємств впровадили шахтні зерносушарки, однак у зв'язку із значним зростанням урожайності виникла необхідність підвищити продуктивність сушіння без капітальної модернізації самого сушильного агрегату. Найпростіше технічне рішення полягає у використанні додаткового охолоджувального модуля, що дозволяє використовувати теплоохолоджувач зерна як проміжний елемент теплообміну. Проте це ставить завдання організації ефективного охолодження гарячого зерна, що надходить з сушарки, із забезпеченням мінімальних втрат якості зерна та енергоресурсів.

#### Впровадження поточного охолоджувача зерна (типу ОЗ)

Для підвищення продуктивності сушіння розглядається встановлення потокового охолоджувача зерна типу ОЗ, призначеного для безперервного термомасообмінного охолодження зернових та олійних культур (пшениця, жито, ячмінь, овес, кукурудза, рис, ріпак тощо). Цей охолоджувач ефективно функціонує з різними зерновими культурами як насінневого, так і продовольчого чи фуражного призначення. Основна функція охолоджувача полягає у зниженні температури зерна до безпечного рівня з мінімальними втратами вологості, що забезпечує збереження структури зернової оболонки,

					ДСА 00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		38

попереджає конвекційні і кондуктивні втрати та зменшує ризики псування зерна при зберіганні.

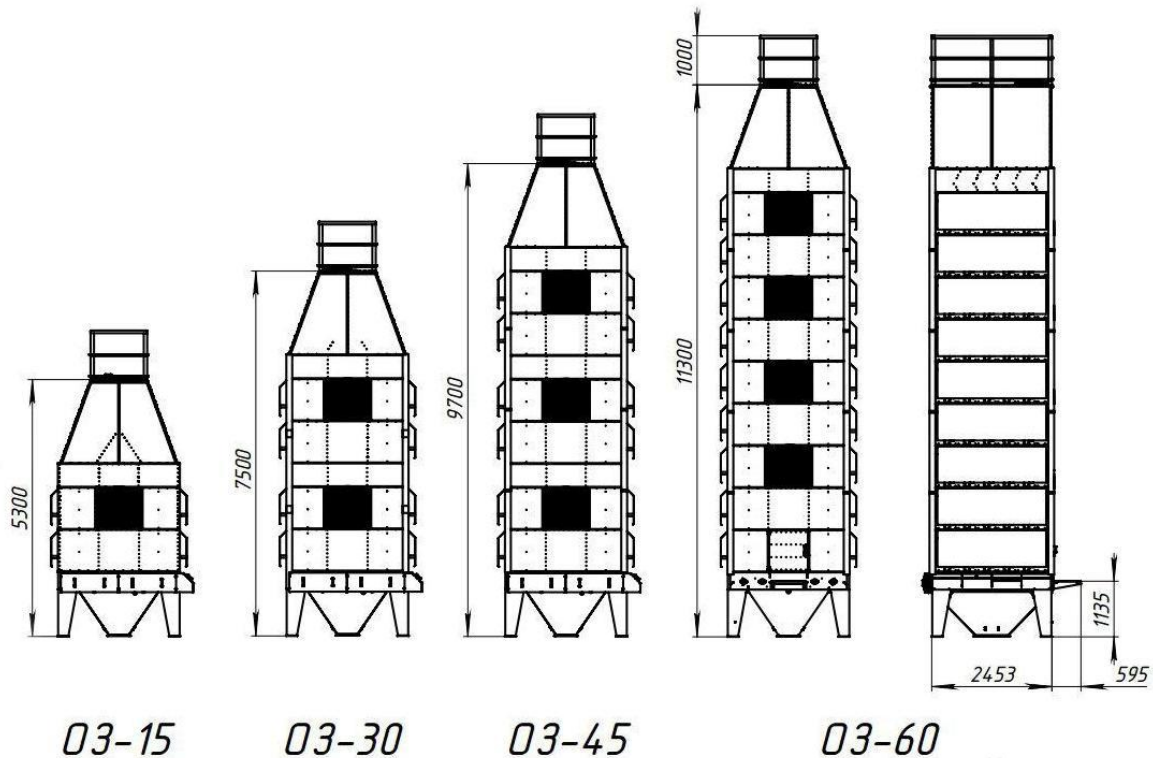


Рис. 3.4. Охолоджувач зерна типу ОЗ

#### Математичний опис теплообміну в охолоджувачі зерна

Теплообмін між зерною масою та повітрям у охолоджувачі можна описати рівнянням балансу теплової енергії:

$$Q = m_z \cdot c_z \cdot (T_{z,вх} - T_{z,вих}) = m_a \cdot c_a \cdot (T_{a,вих} - T_{a,вх})$$

де:

- $Q$  — теплова потужність, Вт;
- $m_z$  — масова витрата зерна, кг/с;
- $c_z$  — питома теплоємність зерна, Дж/(кг·°С) (залежить від вологості, в середньому близько 1400 Дж/(кг·°С));

- $T_{z,вх}, T_{z,вих}$  — температура зерна на вході і виході з охолоджувача, °С;

- $m_a$  — масова витрата повітря, кг/с;

- $c_a$  — питома теплоємність повітря (приблизно 1005 Дж/(кг·°С));

- $T_{a,вх}, T_{a,вих}$  — температура повітря на вході і виході.

Для визначення  $m_a$  використовується формула:

$$m_a = \rho_a \cdot V_a$$

де:

- $\rho_a$  — густина повітря (приблизно 1.2 кг/м<sup>3</sup>);

- $V_a$  — об'ємна витрата повітря, м<sup>3</sup>/с.

#### Конвективний теплообмін

Теплова потужність, що передається від зерна до повітря в охолоджувачі, залежить від коефіцієнта теплопередачі  $\alpha$ , площі теплообміну  $A$  та різниці температур:

$$Q = \alpha \cdot A \cdot (T_z - T_a)$$

де:

- $\alpha$  — коефіцієнт конвективного теплообміну, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);

- $A$  — площа контакту зерна з повітрям, м<sup>2</sup>;

- $T_z, T_a$  — середні температури зерна та повітря.

Для визначення коефіцієнта теплообміну в шарах зерна можна застосувати емпіричне співвідношення:

$$\alpha = k \cdot Re^m \cdot Pr^n$$

де:

- $k, m, n$  — емпіричні коефіцієнти;

- $Re = \frac{\rho_a \cdot V_a \cdot d}{\mu}$  — число Рейнольдса (характеризує режим потоку

повітря, де  $d$  — характерний розмір зерна,  $\mu$  — динамічна в'язкість повітря);

- $Pr$  — число Прандтля.

## Масообмін і випаровування вологи

Інтенсивність випаровування вологи з зерна визначається законом

Фіка:

$$J = -D \cdot \frac{dw}{dx}$$

де:

- $J$  — масовий потік вологи,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;
- $D$  — коефіцієнт дифузії вологи у зерні,  $\text{м}^2/\text{с}$  (залежить від температури і вологості, приблизно  $10^{-9} - 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$ );
- $\frac{dw}{dx}$  — градієнт вологості всередині зерна.

Гранична швидкість сушіння обмежується як внутрішньою дифузією вологи, так і конвективним видаленням пари з поверхні зерна.

### Баланс вологи в охолоджувачі

Облік маси вологи, яка видаляється з зерна під час охолодження, здійснюється через рівняння масового балансу:

$$m_z \cdot (w_{\text{вх}} - w_{\text{вих}}) = m_a \cdot (x_{\text{вих}} - x_{\text{вх}})$$

де:

- $w_{\text{вх}}, w_{\text{вих}}$  — вологість зерна на вході і виході (в  $\text{кг}$  води на  $\text{кг}$  сухої речовини);
- $x_{\text{вх}}, x_{\text{вих}}$  — концентрація вологи у повітрі на вході і виході ( $\text{кг}$  води на  $\text{кг}$  сухого повітря).

Для агрегату продуктивністю  $60 \text{ т/год}$  (приблизно  $16,7 \text{ кг/с}$ ) при охолодженні зерна з температури  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ :

5. Потрібно визначити теплову потужність охолодження:

$$Q = 16.7 \cdot 1400 \cdot (40 - 25) = 350700 \text{ Вт} \approx 351 \text{ кВт}$$

2. За питомою теплоємністю повітря визначаємо необхідну масу повітря:

$$m_a = \frac{Q}{c_a \cdot (T_{\text{а,вих}} - T_{\text{а,вх}})}$$

					<i>ДСА 00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		41

При різниці температур повітря  $T_{a,вих} - T_{a,вх} = 10^{\circ}\text{C}$ :

$$m_a = \frac{350700}{1005 \cdot 10} \approx 34.9 \text{ кг/с}$$

3. Об'ємна витрата повітря:

$$V_a = \frac{m_a}{\rho_a} = \frac{34.9}{1.2} \approx 29.1 \text{ м}^3/\text{с}$$

Отже, розроблена математична модель процесу охолодження зерна в охолоджувачі ОЗ дозволяє комплексно описати динаміку тепло- та масообмінних процесів із урахуванням конвекції, теплопровідності та дифузії вологи в шарі зерна. Запропонована модель базується на системі параціальних диференціальних рівнянь, що враховують рух зерна та повітря, тепловий та масовий транспорт, а також взаємодію між фазами через коефіцієнти тепло- та масопереносу. Застосування чисельних методів для розв'язання даної системи рівнянь дає змогу прогнозувати температурний режим і зміну вологості зерна на різних стадіях охолодження, що є критично важливим для забезпечення високої якості кінцевого продукту. Врахування сучасних параметрів та фізико-хімічних властивостей зерна й повітря підвищує точність моделі та ефективність керування процесом. Розроблена модель може бути інтегрована в системи автоматизованого управління охолодженням зерна, що дозволить оптимізувати енергоспоживання, мінімізувати втрати якості та підвищити продуктивність зерносушарного комплексу. Таким чином, математичне моделювання та комп'ютерне моделювання охолодження зерна є важливими інструментами для сучасного агропромислового комплексу і забезпечення сталого розвитку зернопереробної галузі.

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

## 4. Охорона праці

### 4.1 Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів при експлуатації зерносушарки

При експлуатації зерносушарного агрегату можливий вплив низки небезпечних і шкідливих факторів, які можуть призвести до травматизму або професійних захворювань персоналу. Основні фактори включають:

Механічні ризики: контакт з рухомими елементами (транспортувальні норії, вентилятори, шнеки), а також з частинами, що обертаються (привідні механізми), що створює ризик затягування, защемлення або відриву кінцівок;

Вібраційний і шумовий вплив: високий рівень шуму та вібрації, що генеруються роботою двигунів та вентиляторів, може викликати професійні захворювання органів слуху та опорно-рухового апарату;

Пожежна і вибухонебезпека: наявність пилу, олійних забруднень, високі температури нагрівальних елементів і теплоносія, що може спричинити загоряння або вибух, особливо у присутності зернового пилу;

Електробезпека: небезпека ураження електричним струмом внаслідок пошкоджень ізоляції, порушення правил технічної експлуатації та електробезпеки (ПУЕ);

Небезпечні параметри мікроклімату: підвищена температура, вологість або недостатня вентиляція можуть порушувати санітарно-гігієнічні норми, спричиняючи теплові стреси та знижуючи працездатність;

Фізичні травми: наявність гострих кромek конструкційних елементів, шорстких або гарячих поверхонь, які можуть спричинити порізи, опіки чи інші травми.

### 4.2 Заходи з покращення умов праці та усунення виробничих ризиків

Для мінімізації небезпечних і шкідливих факторів у процесі експлуатації зерносушарки проведено комплекс модернізаційних та організаційних заходів:

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

Вентиляція: у приміщенні встановлено припливно-витяжну систему вентиляції, що забезпечує ефективний повітрообмін, підтримання нормативних параметрів мікроклімату та видалення шкідливих аерозолів;

Організація робочого місця: розроблені рекомендації щодо ергономічного розташування пульта керування і робочих зон оператора для зниження фізичних навантажень та покращення безпеки;

Автоматизація управління: впроваджено пульт управління із системою автоматичного контролю технологічного процесу, що дозволяє оператору працювати у безпечному режимі, мінімізуючи ручні втручання;

Заземлення обладнання: встановлено систему захисного заземлення згідно з нормами ПУЕ для запобігання ураженню електричним струмом;

Захист від вибуху: обладнання оснащено вибухорозрядними клапанами, а продукти вибуху виведено за межі приміщення через трубопроводи з поперечним перерізом 500 мм<sup>2</sup>, відповідно до “Інструкції по встановленню і експлуатації вибухорозрядників технологічного обладнання комбикормових підприємств”;

Відповідність силових зусиль: зусилля на органах управління та ручного регулювання не перевищують нормативи, визначені ДСТУ 2189-93, що забезпечує комфорт і безпеку операторів;

Огорожа небезпечних зон: встановлено захисні огорожі згідно з ГОСТ 12.4.042, що виключають доступ до рухомих і небезпечних механізмів;

Заходи електробезпеки (відповідно до ПУЕ):

ізоляція струмоведучих частин із застосуванням діелектричних матеріалів;

обмеження доступу до електричних мереж;

впровадження блокувального устаткування з автоматичним відключенням напруги при аваріях;

використання низьковольтних ланцюгів (до 42 В);

встановлення попереджувальної сигналізації;

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

застосування засобів індивідуального захисту (ЗІЗ).

#### 4.3 Підвищення пожежної безпеки

Для зниження ризику пожежі проведено реконструкцію камери нагріву зерносушарки з установкою спеціальних елементів, що гальмують накопичення пилу. Зокрема, по всій довжині нагрівальних труб наварено дві сталеві смуги під кутом  $45^\circ$  одна до одної (рис. 4.1), що запобігає налипанню олійного пилу на нижні ділянки конструкції та підвищує безпеку експлуатації.

Такий системний підхід до аналізу виробничих ризиків та впровадження комплексу технічних, організаційних і нормативних заходів забезпечує безпечну експлуатацію зерносушарного обладнання, мінімізує травматизм і професійні захворювання, а також сприяє підвищенню продуктивності та надійності технологічного процесу.

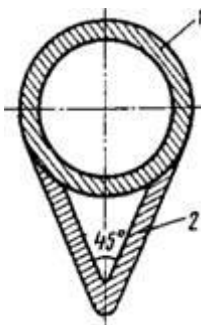


Рис. 4.1. Удосконалення елементів, що гальмують, в камері нагріву: 1 — труба; 2 - сталева смуга.

#### 5. Економічна частина

Метою модернізації зерносушарки А1-ДП50 було підвищення продуктивності та зниження собівартості сушіння за рахунок впровадження другого контуру рециркуляції зерна та використання альтернативного палива — лузги соняшнику та відходи від переробки агропродукції. Виконано розрахунок економічної доцільності модернізації із урахуванням основних факторів експлуатаційних витрат. Модернізація зерносушарки А1-ДП50

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

дозволяє підвищити продуктивність на 56%, зменшити собівартість сушіння більш ніж у 3,5 рази.

Значна економія пального за рахунок переходу на дешевше альтернативне паливо – лузгу соняшнику.

Скорочення робочого часу зменшує витрати на оплату праці.

Витрати на електроенергію залишаються приблизно на тому ж рівні.

Вкладені інвестиції окупаються приблизно за 2 місяці, що свідчить про високу ефективність модернізації.

Загалом модернізація є економічно доцільною та вигідною для впровадження на комбінатах та підприємствах агропромислового комплексу.

### Список літератури

1. Особливості процесу сушіння сільськогосподарських матеріалів методом протитечії / В.Ф. Дідух // Збірник наукових статей РВВ ЛДТУ. – Луцьк, 1998. – Вип. 3. – С. 38–41.
2. Переваги сушіння насіннєвих матеріалів методом протитечії / В.Ф. Дідух // Збірник наукових статей РВВ ЛДТУ. – Луцьк, 2000. – Вип. 6. – С. 59–63.
3. Дідух В.Ф. Науково-технологічні основи механізованого сушіння неоднорідних рослинних матеріалів : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.11 / В.Ф. Дідух. – Луцьк, 2003. – 274 с.
4. Осадчий С.І., Скриннік М.О., Скриннік І.О. Зерносушильна установка з киплячим шаром для сушіння зернових як об'єкт автоматизації / С.І. Осадчий, М.О. Скриннік, І.О. Скриннік // Збірник наукових праць Кіровоградського національного технічного університету. – Кіровоград, 2006. – Вип. 17. – С. 61–66.
5. Осадчий С.І., Калита М.О., Скриннік І.О. Визначення структури і параметрів математичної моделі зерносушильної установки з киплячим шаром у реальних експлуатаційних умовах / С.І. Осадчий, М.О. Калита, І.О. Скриннік // Вісник ХНТУ. – Харків, 2008. – Вип. 73, Т. 2. – С. 43–45.
6. Осадчий С.І., Скриннік М.О., Скриннік І.О. Ідентифікація сигналів зерносушильної установки з киплячим шаром в реальних експлуатаційних умовах / С.І. Осадчий, М.О. Скриннік, І.О. Скриннік // Вісник Хмельницького НТУ. – Хмельницький, 2007. – Вип. 3, Т. 1. – С. 38–41.

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

7. Петренко М.М., Скриннік І.О. Зерносушильна установка касетного типу для сушіння зернових культур / М.М. Петренко, І.О. Скриннік // Збірник наукових праць Кіровоградського НТУ. – Кіровоград, 2004. – Вип. 15. – С. 318–323.
8. Петренко М.М., Скриннік І.О., Богатирьов Д.В. Експериментальні дослідження впливу параметрів зерносушарки каскадного типу на показники її роботи / М.М. Петренко, І.О. Скриннік, Д.В. Богатирьов // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград, 2006. – Вип. 36. – С. 29–34.
9. Петренко М.М., Скриннік І.О., Богатирьов Д.В. Детермінована математична модель руху насіння по каскадах зерносушарки каскадного типу / М.М. Петренко, І.О. Скриннік, Д.В. Богатирьов // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград, 2007. – Вип. 37. – С. 299–304.
10. Петренко М.М., Скриннік І.О., Богатирьов Д.В. Результати експериментальних досліджень впливу основних параметрів на процес сушіння зернових культур у зерносушарці каскадного типу / М.М. Петренко, І.О. Скриннік, Д.В. Богатирьов // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – Тернопіль, 2007. – Вип. 3, Т. 12. – С. 53–59.
11. Петренко М.М., Скриннік І.О., Богатирьов Д.В. Визначення швидкості фільтрації та гідравлічного опору на каскадах сіток зерносушарки касетного типу / М.М. Петренко, І.О. Скриннік // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь, 2005. – Вип. 34. – С. 160–165.
12. Петренко М.М., Сабірзянов Т.Г., Скриннік І.О. Модель переносу тепла в зерносушарці каскадного типу від каскаду до шару насіння / М.М. Петренко, Т.Г. Сабірзянов, І.О. Скриннік // Збірник наукових праць Кіровоградського НТУ. – Кіровоград, 2008. – Вип. 20. – С. 293–298.
13. Петренко М.М., Скриннік І.О., Скриннік М.О. Модель зміни шпаруватості псевдо розрідження шару насіння на каскадах зерносушарки касетного типу / М.М. Петренко, І.О. Скриннік, М.О. Скриннік // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград, 2008. – Вип. 38. – С. 258–264.
14. Сало В.М., Скриннік І.О. Вплив основних параметрів зерносушарки каскадного типу на процес сушіння зернових культур у киплячому стані / В.М. Сало, І.О. Скриннік // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград, 2008. – Вип. 38. – С. 215–220.
15. Патент України на корисну модель № 10346 U. Зерносушильна установка касетного типу : деклараційний патент / М.М. Петренко, І.О. Скриннік, Кіровоградський НТУ ; заявл. 18.04.2005 ; опубл. 15.11.2005. – 4 с.

					<i>ДСА 00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		47

16. Mujumdar A.S. Handbook of Industrial Drying / A.S. Mujumdar. – 4th ed. – Boca Raton : CRC Press, 2014. – 960 p.
17. Ratti C. Hot Air and Freeze-Drying of High-Value Foods: A Review / C. Ratti // Journal of Food Engineering. – 2001. – Vol. 49, No. 4. – P. 311–319.
18. Verma L.R., Bucklin R.A. Postharvest Technology of Cereals, Pulses and Oilseeds / L.R. Verma, R.A. Bucklin. – Boulder : Westview Press, 1996. – 354 p.
19. Chen X.D., Mujumdar A.S. (eds.) Drying Technology in Agriculture and Food Sciences / X.D. Chen, A.S. Mujumdar. – Boca Raton : CRC Press, 2008.
20. Bimakr M., Ghanbarzadeh B., Shahidi F., et al. Drying Technologies for Improving Nutraceuticals and Bioactive Compounds in Foods: A Review / M. Bimakr, B. Ghanbarzadeh, F. Shahidi et al. // Food Reviews International. – 2017. – Vol. 33, No. 2. – P. 145–168.
21. Aguilera J.M., Stanley D.W. Microstructural Principles of Food Processing and Engineering / J.M. Aguilera, D.W. Stanley. – New York : Springer, 1999. – 480 p.
22. Henderson S.M., Perry R.L. Agricultural Process Engineering / S.M. Henderson, R.L. Perry. – Westport : AVI Publishing, 1983. – 460 p.
23. Fellows P.J. Food Processing Technology: Principles and Practice / P.J. Fellows. – 4th ed. – Cambridge : Woodhead Publishing, 2016.
24. Masters K. Introduction to Environmental Engineering and Science / K. Masters. – 3rd ed. – Upper Saddle River : Prentice Hall, 1998.
25. Barbosa-Cánovas G.V., Juliano P. (eds.) Food Powders: Physical Properties, Processing, and Functionality / G.V. Barbosa-Cánovas, P. Juliano. – New York : Springer, 2010.
26. Технологія післязбиральної обробки та сушіння зерна [Електронний ресурс] // propozitsiya.com. – Режим доступу : <https://propozitsiya.com/tehnologiya-pislyazbiralnoyi-obrobki-ta-sushinnya-zerna>.

					<i>ДСА 00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис.	Дата		48

## ІНЖЕНЕРНО-ТЕХНІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ТЕПЛООВОГО РЕЖИМУ СУШІННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР

### 1. Вихідні передумови та постановка завдання

Мета розрахунку — визначення питомих теплових витрат та параметрів енергетичного балансу при термодеструктивній обробці зернової маси різних агрокультур (пшениця, соняшник, соя, жито) у шахтній сушарці періодичної дії типу А1-ДСП-50 після її технологічної модернізації з уведенням подвійного контуру рециркуляції повітряного середовища.

### 2. Фізико-технічні параметри зерна та умов сушіння

Параметр	Позначення	Одиниця виміру	Пшениця	Соняшник	Соя	Жито
Початкова вологість	$W_1$	%	22	35	18	24
Кінцева вологість	$W_2$	%	14	9	12	14
Температура сушильного агента	$t_a$	°C	110	115	105	108
Температура вихідного зерна	$t_z$	°C	55	50	52	53
Теплота випаровування води	$r$	кДж/кг	2250	2400	2300	2250
Маса 1 тонни зерна	$m$	кг	1000	1000	1000	1000

### 3. Методологія розрахунку теплових витрат

Загальні питомі витрати теплоти на сушіння зерна обчислюються за формулою:

$$Q_{\text{заг}} = Q_{\text{волога}} + Q_{\text{нагрів}} + Q_{\text{втрати}}$$

де:

- $Q_{\text{волога}} = m_w \cdot r$  – витрати теплоти на випаровування води;
- $Q_{\text{нагрів}} = m \cdot c \cdot (t_z - t_0)$  – витрати теплоти на нагрів зерна;
- $Q_{\text{втрати}} = Q_{\text{волога}} \cdot \eta^{-1} - Q_{\text{волога}}$  – втрати теплоти внаслідок недосконалості процесу.

Розрахунок маси видаленої води:

$$m_w = m \cdot \frac{W_1 - W_2}{100 - W_2}$$

### 4. Розрахунок теплового балансу (результати)

Культура	$m_w$ , кг	$Q_{\text{волога}}$ , МДж	$Q_{\text{нагрів}}$ , МДж	$Q_{\text{заг}}$ , МДж
Пшениця	93	209,25	83,6	~380

Культура	$m_w$ , кг	$Q_{\text{волога}}$ , МДж	$Q_{\text{нагрів}}$ , МДж	$Q_{\text{заг}}$ , МДж
Соняшник	285,7	685,7	70,0	~860
Соя	68,2	156,8	81,1	~290
Жито	116,3	261,7	84,8	~400

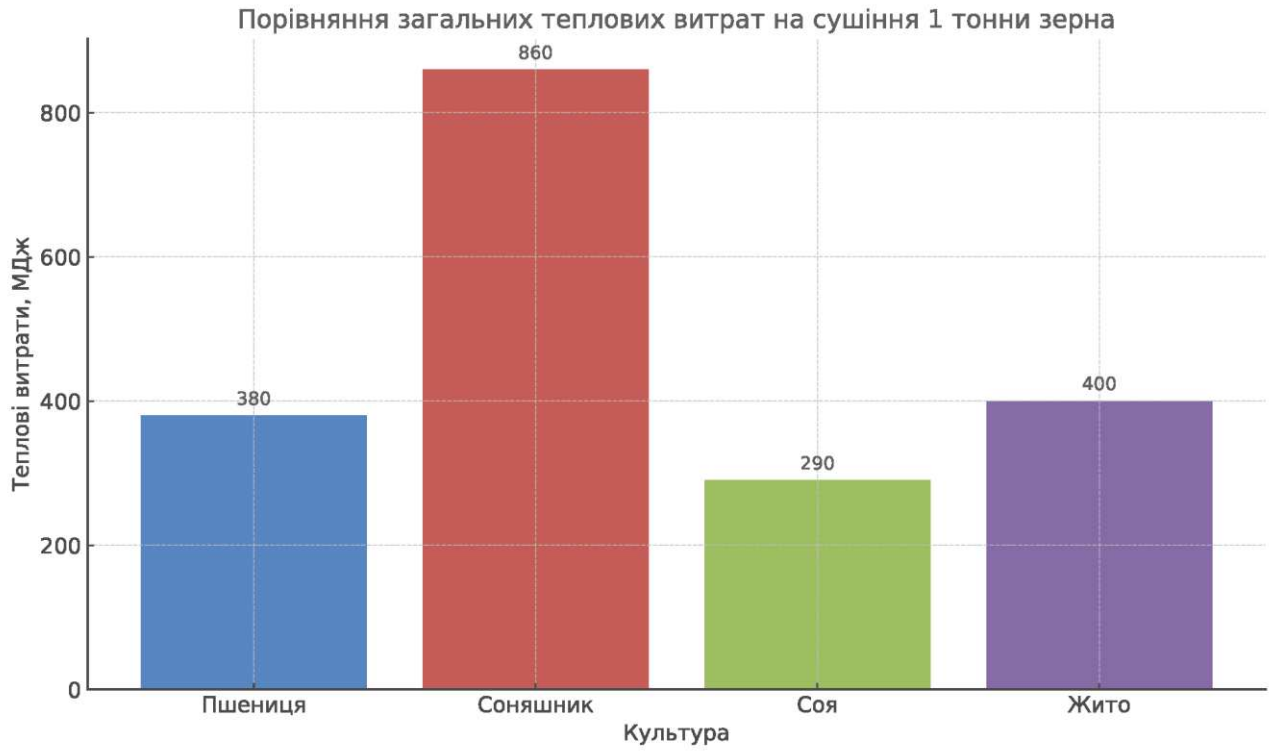
## 5. Аналіз результатів

- **Соняшник** демонструє найвищі витрати теплової енергії через високий початковий вміст вологи.
- **Соя** має найнижчі питомі витрати за рахунок низької початкової вологості та меншої теплотворної здатності випаровуваної вологи.
- **Пшениця та жито** показують середній рівень витрат теплоти з відносно стабільною тепловою ефективністю сушіння.

## 6. Коефіцієнт енергоефективності (КЕЕ)

$$\text{КЕЕ} = \frac{Q_{\text{волога}}}{Q_{\text{заг}}}$$

Культура	КЕЕ
Пшениця	0,55
Соняшник	0,80
Соя	0,54
Жито	0,65



## Додаток Б Економічна частина

### Аналіз ефективності модернізації зерносушарки А1-ДП50

#### 1. Вступ

Метою модернізації зерносушарки А1-ДП50 було підвищення продуктивності та зниження собівартості сушіння за рахунок впровадження другого контуру рециркуляції зерна та використання альтернативного палива — лузги соняшнику. Виконано розрахунок економічної доцільності модернізації із урахуванням основних факторів експлуатаційних витрат.

#### 2. Вихідні дані

Показник	Одиниці вимірювання	Базова сушарка	Модернізована сушарка
Продуктивність	т/год	32	50
Обсяг сушіння	т	25 840	25 840
Витрати дизельного пального	кг/т	8,5	-
Витрати лузги	кг/т	-	12
Витрати електроенергії	кВт·год/т	2,5	2,65
Зарплата тракториста	грн/год	80	80
Амортизація (річна)	грн	172 471	175 270
Вартість модернізації	грн	-	1 752 700

#### 3. Розрахунок витрат

##### 3.1 Паливо

- Базова технологія (дизель):  
 $8,5 \text{ кг/т} \Rightarrow 10,22 \text{ л/т} \times 55,3 \text{ грн/л} = 565,9 \text{ грн/т}$   
Загальна вартість:  
 $565,9 \times 25840 = 14618056 \text{ грн}$
- Модернізована (лузга соняшнику):  
 $12 \text{ кг/т} \times 12 \text{ грн/кг} = 144 \text{ грн/т}$   
Загальна вартість:  
 $144 \times 25840 = 3721000 \text{ грн}$

##### 3.2 Електроенергія

При вартості 5 грн/кВт·год:

- Базова:  
 $2,5 \times 25 840 \times 5 = 323 000 \text{ грн}$
- Модернізована:  
 $2,65 \times 25 840 \times 5 = 342 380 \text{ грн}$

##### 3.3 Зарплата

- Час роботи:  
Базова =  $\frac{25 840}{32} = 807,5 \text{ год}$  Модернізована =  $\frac{25 840}{50} = 516,8 \text{ год}$

- Вартість:  
Базова =  $807,5 \times 80 = 64\,600$  грн Модернізована =  $516,8 \times 80 = 41\,344$  грн

## 3.4 Інші витрати (5% від суми паливо+енергія+зарплата)

- Базова:  
 $0,05 \times (14\,618\,056 + 323\,000 + 64\,600) = 750\,283$  грн
- Модернізована:  
 $0,05 \times (3\,721\,000 + 342\,380 + 41\,344) = 205\,236$  грн

## 4. Підсумкові витрати (грн/рік)

Стаття витрат	Базова сушарка	Модернізована сушарка
Паливо	14 618 056	3 721 000
Електроенергія	323 000	342 380
Зарплата	64 600	41 344
Інші витрати	750 283	205 236
Разом без амортизації	15 755 939	4 309 960
Амортизація	172 471	175 270
Всього	15 928 410	4 485 230

## 5. Питома собівартість сушіння, грн/т

Показник	Значення
Базова технологія	616,5
Модернізована технологія	173,5

## 6. Економічний ефект

- Річна економія:  
 $15\,928\,410 - 4\,485\,230 = 11\,443\,180$  грн
- Термін окупності:  
 $\frac{1\,752\,700}{11\,443\,180} \approx 0,15$  роки  $\approx 2$  місяці

Вид палива	Ціна, грн/т	Теплотворна здатність, ГДж/т	Витрати, кг/т зерна
Лузга соняшника	4 000	17,0	6,0
Солома пшенична	3 000	15,0	3,0
Лушпиння кукурудзи	3 500	16,5	3,0

## Розрахунок питомих витрат палива:

- Загальна норма: 12 кг/т зерна
- Пропорції (за масою):

- Лузга соняшника — 50% (6 кг/т)
- Солома — 25% (3 кг/т)
- Лушпиння кукурудзи — 25% (3 кг/т)

Вартість палива на 1 т зерна:

- Лузга соняшника:  $6 \text{ кг} \times 4\,000 \text{ грн/т} = 24 \text{ грн}$
- Солома:  $3 \text{ кг} \times 3\,000 \text{ грн/т} = 9 \text{ грн}$
- Лушпиння:  $3 \text{ кг} \times 3\,500 \text{ грн/т} = 10,5 \text{ грн}$
- Всього:  $24 + 9 + 10,5 = 43,5 \text{ грн/т зерна}$

Вартість палива на рік:

Обсяг сушіння — 25 840 т

$25\,840 \text{ т} \times 43,5 \text{ грн/т} = 1\,123\,140 \text{ грн/рік}$

Показник	Модернізована (тільки лузга)	Модернізована (з сумішшю)
Вартість палива, грн/т	$48\,000 / 12\,000 \text{ кг} \times 4000 \text{ грн} = 48 \text{ грн/т}$ (попереднє)	43,5 грн/т
Витрати палива на рік, грн	3 721 000	1 123 140

## 7. Висновки

1. Модернізація зерносушарки А1-ДП50 дозволяє підвищити продуктивність на 56%, зменшити собівартість сушіння більш ніж у 3,5 рази.
2. Значна економія пального за рахунок переходу на дешевше альтернативне паливо – лузгу соняшнику.
3. Скорочення робочого часу зменшує витрати на оплату праці.
4. Витрати на електроенергію залишаються приблизно на тому ж рівні.
5. Вкладені інвестиції окупаються приблизно за 2 місяці, що свідчить про високу ефективність модернізації.
6. Загалом модернізація є економічно доцільною та вигідною для впровадження на комбінатах та підприємствах агропромислового комплексу.
7. Використання суміші агропалив (лузга соняшника + солома + лушпиння кукурудзи) дозволяє значно знизити вартість палива — майже в 3,3 рази у порівнянні з використанням лише лузги соняшника.