





## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Анотація, зміст; перелік умовних позначень, термінів	20.04.25	
2	Вступ	22.04.25	
3	Порівняльний аналіз технічних рішень поставленої задачі	28.04.25	
4	Техніко-економічне, соціальне обґрунтування	30.04.25	
5	Характеристика вихідної сировини і готового продукту	02.05.25	
6	Опис запропонованого технічного рішення. Будова та принцип роботи обладнання	04.05.25	
7	Розрахункова частина	08.05.25	
8	Вибір конструкційних матеріалів	10.05.25	
9	Технологічний маршрут виготовлення деталі	14.05.25	
10	Вимоги щодо монтажу і технічного сервісу	16.05.25	
11	Опис системи управління	18.05.25	
12	Заходи щодо охорони праці	20.05.25	
13	Загальні висновки	22.05.25	
14	Список використаних літературних джерел	24.05.25	
15	Графічна частина: 5 аркушів	28.05.25	
16	Подання КР на кафедрі	01.06.25	

**Здобувач** \_\_\_\_\_  
(підпис)

**Керівник роботи** \_\_\_\_\_  
(підпис)

**Андрій ЧЕРКЕСЕНКО**  
(ім'я та прізвище)

**Андрій СЛЮСЕНКО**  
(ім'я та прізвище)

## АНОТАЦІЯ

Черкесенко А. О. кваліфікаційна робота на тему «Модернізація конструкції шахтної зерносушарки марки ДСП-32-ОТ» подана на здобуття ОС «Бакалавр» зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» ОП «Інжиніринг харчових та біотехнологічних виробництв».

В кваліфікаційній роботі проведено аналіз конструкцій шахтних зерносушарок та визначено напрямок модернізації зерносушарки ДСП-32-ОТ – впровадження контуру рециркуляції зерна. Дане технічне рішення забезпечує підвищення її ефективності роботи. Впровадження рециркуляції дозволяє більш гнучко регулювати технологічний процес сушіння зерна.

Кваліфікаційна робота складається з пояснювальної записки обсягом \_\_\_ сторінок формату А4 та графічної частини загальним обсягом 5 аркушів формату А1.

**Ключові слова:** зерно, сушіння, зерносушарка, сушильний агент, рециркуляція.

<i>Відповідальна організація</i> <b>НУХТ</b>	<i>Технічне узгодження</i> Слясенко А.М.	<i>Вид документа</i> <b>Пояснювальна записка</b>		<i>Статус документа</i>			
<i>Власник документа</i> <b>НУХТ</b>	<i>Розробник документа</i> Черкесенко А.О.	<i>Назва, додаткова назва</i> <b>Кваліфікаційна робота</b>	<b>093545.КР.18.000.ПЗ</b>				
	<i>Документ затверджено</i> Якимчук М.В.		<i>Інд. змін.</i>	<i>Дата видання</i>	<i>Мова</i> <b>UA</b>	<i>Аркуш</i> 1/76	

## ABSTRACT

Cherkesenko A. O. qualification work on the topic "Modernization of the design of a shaft grain dryer of the DSP-32-OT brand" submitted for the award of the OS "Bachelor" in the specialty 133 "Industrial mechanical engineering" of the OP "Food and biotechnological production engineering".

The qualification work analyzed the designs of shaft grain dryers and determined the direction of modernization of the DSP-32-OT grain dryer - the introduction of a grain recirculation circuit. This technical solution ensures an increase in its efficiency. The introduction of recirculation allows for more flexible regulation of the technological process of grain drying.

The qualification work consists of an explanatory note with a volume of \_\_\_ pages of A4 format and a graphic part with a total volume of 5 sheets of A1 format.

**Keywords:** grain, drying, grain dryer, drying agent, recirculation.

## ЗМІСТ

Вступ.....	
1. Порівняльний аналіз технічних рішень поставленої задачі.....	
2. Техніко-економічне, соціальне обґрунтування.....	
3. Характеристика вихідної сировини і готового продукту.....	
4. Опис запропонованого технічного рішення. Будова та принцип роботи обладнання.....	
5. Розрахункова частина.....	
6. Вибір конструкційних матеріалів.....	
7. Технологічний маршрут виготовлення деталі.....	
8. Вимоги щодо монтажу і технічного сервісу.....	
9. Опис системи управління.....	
10. Заходи щодо охорони праці.....	
Висновки.....	
Список використаних літературних джерел.....	

## ВСТУП

Зерносушіння є одним із найважливіших післязбиральних процесів, що безпосередньо впливає на збереження врожаю, його якість та подальшу придатність для переробки чи споживання. Своєчасне та якісне видалення надлишкової вологи з зернової маси запобігає розвитку мікроорганізмів, самозігріванню та втратам сухої речовини, забезпечуючи довготривале зберігання та підтримання високих технологічних властивостей зерна.

Актуальні напрямки розвитку технології сушіння зерна спрямовані на підвищення енергоефективності процесу, зниження собівартості сушіння, мінімізацію негативного впливу на якість зерна та зменшення шкідливих викидів в атмосферу. Серед ключових тенденцій варто відзначити розробку та впровадження:

- енергоощадних технологій: використання альтернативних джерел енергії (сонячна, біомаса), рекуперація тепла відпрацьованого повітря, оптимізація режимів сушіння залежно від типу та вологості зерна;
- інтелектуальних систем керування: автоматизація процесу сушіння з використанням датчиків вологості та температури, що дозволяє точно контролювати параметри сушіння та мінімізувати споживання енергії;
- нових конструкцій сушарок: розробка більш ефективних та компактних сушарок, що забезпечують рівномірне просушування зернової маси та знижують її механічне пошкодження;
- попередньої обробки зерна: застосування технологій, що підвищують швидкість та ефективність сушіння, наприклад, інфрачервоне або мікрохвильове нагрівання.

Одним із найпоширеніших типів зерносушарок є шахтні сушарки, які являють собою вертикальні камери (шахти), де зерно рухається під дією гравітації, а нагріте повітря проходить через його шар. Конструкція шахтних сушарок може включати різні зони для попереднього нагріву, власне сушіння

та охолодження зерна, а також системи рекуперації тепла для підвищення енергоефективності.

Незважаючи на широке поширення, типові шахтні сушарки для сушіння зерна мають низку суттєвих недоліків, серед яких:

- нерівномірність просушування зерна: через нерівномірний розподіл повітряного потоку по перерізу шахти, зерно, що знаходиться ближче до повітророзподільних каналів, просушується інтенсивніше, ніж зерно у віддалених зонах. Це призводить до необхідності перемішування зернової маси або зниження продуктивності сушарки для забезпечення прийнятної якості сушіння;
- високе енергоспоживання: значні втрати тепла з відпрацьованим повітрям та неоптимальні режими роботи призводять до високих витрат енергоресурсів;
- механічне пошкодження зерна: інтенсивне переміщення зерна у шахті може призводити до його пошкодження, особливо для крихких культур;
- складність регулювання процесу: ручне або недостатньо точне автоматизоване керування параметрами сушіння ускладнює досягнення оптимальних результатів сушіння при зміні вологості або типу зерна.

Усунення зазначених недоліків шахтних сушарок є важливим завданням для подальшого розвитку технологій післязбиральної обробки зерна та підвищення ефективності виробництва.

# 1. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ПОСТАВЛЕНОЇ ЗАДАЧІ

Сушіння зерна являє собою складний термодинамічний процес видалення вологи з гігроскопічного матеріалу шляхом тепломасообміну між зерном та сушильним агентом (зазвичай нагрітим повітрям). Швидкість та ефективність сушіння залежать від ряду факторів, включаючи:

- фізико-хімічні властивості зерна: вид культури, початкова вологість, розмір та форма зернин, їх теплоємність та теплопровідність;
- параметри сушильного агента: температура, вологість, швидкість руху повітря;
- конструкційні особливості зерносушарки: тип, розміри, система повітророзподілу, спосіб руху зерна.

Розрізняють кілька стадій процесу сушіння, включаючи період постійної швидкості сушіння, коли волога вільно випаровується з поверхні зерна, та період спадної швидкості сушіння, коли швидкість випаровування обмежується дифузією вологи з внутрішніх шарів зерна.

Для сушіння зерна використовуються різні типи зерносушарок, які відрізняються за конструкцією, принципом дії та технологічними характеристиками.

Шахтні (колонні) зерносушарки мають вертикальну шахту, через яку зерно рухається під дією гравітації. Забезпечують високу продуктивність та ефективне використання енергії завдяки протитечійному принципу руху повітря та зерна.

Карусельні зерносушарки відрізняються дбайливим впливом на зерно завдяки його рівномірному розподілу на обертовій платформі та відносно низькій температурі сушіння. Застосовуються для сушіння цінних та дрібнонасінних культур. Мають меншу продуктивність порівняно з шахтними.

Барабанні зерносушарки забезпечують інтенсивне перемішування зерна та високу швидкість сушіння. Можуть бути ефективними для сушіння вологих партій зерна, але потребують значних енергетичних витрат.

Конвеєрні (стрічкові) зерносушарки характеризуються безперервним рухом зерна на стрічковому конвеєрі через зону сушіння. Забезпечують рівномірне сушіння та можливість контролю часу перебування зерна в зоні обробки.

За вектором руху зерна зерносушарки поділяють на вертикальні та горизонтальні. У вертикальних зерносушарках продукція переміщається зверху вниз під дією сили тяжіння. Вертикальними, наприклад, є найпопулярніші зараз – шахтні зерносушарки. У горизонтальних зерно рухається по горизонталі за допомогою спеціального конвеєра. На такому принципі працюють, наприклад, конвеєрні зерносушарки

За принципом руху повітря зерносушарки діляться на сушарки поперечного потоку, сушарки змішаного потоку, сушарки одностороннього потоку і сушарки протитечії. Найбільш поширеними є зерносушарки змішаного потоку і поперечного потоку.

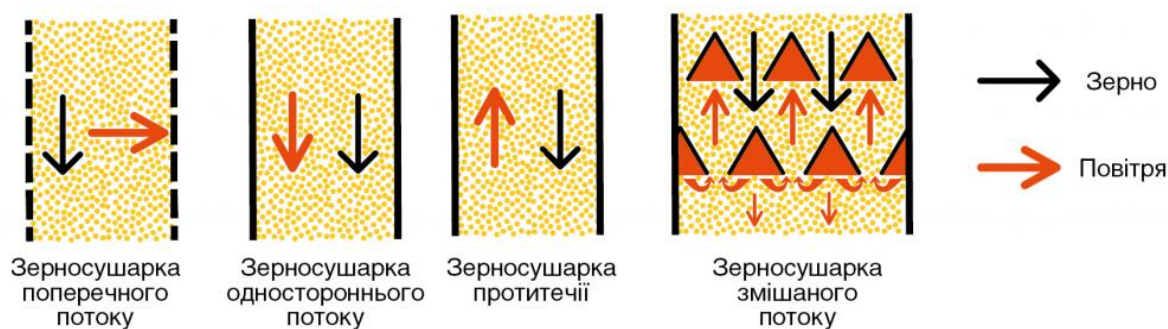


Рис. 1.1. Схема руху повітря та зерна в зерносушарках

Зерносушарки поперечного потоку. Зерно просувається зверху вниз між двох перфорованих стінок зерносушарки. Сушильний агент подається в

середину зерносушарки і проходить назовні через шар зерна і перфорацію, рухаючись поперек потоку зерна.

Зерносушарки змішаного потоку. Сушильний агент подається із зовнішнього боку зернової колони і проходить через неї за допомогою безлічі повітроводів, розташованих у шаховому порядку. Торці одних повітропроводів закриті з одного боку, а торці інших – з іншого. Завдяки цьому гаряче повітря поширюється крізь зерновий шар рівномірно в різних напрямках.

Зерносушарки протитоку. Зерно в цьому обладнанні просувається зверху вниз під дією сили тяжіння, а гаряче повітря подається навпаки – знизу вгору (проти вектору руху зерна).

Зерносушарки одностороннього потоку. Вектори руху робочого агента і зерна збігаються: повітря і зерно просуваються по зерносушарці зверху вниз.

На рис. 1.2. зображено зерносушарку СЗШ-16, яка призначена для сушіння продовольчого та насінневого зерна різних зернових культур. Зерносушарка складається з двох паралельно розташованих шахт 10, встановлених на загальній станині 1, двох виносних охолоджувальних камер 11 вентиляторів 13 і сушильних шахт 14 дифузоров 3 і 4.

Сушильна шахта 10 складається з двох однотипних секцій, встановлених одна на одну. У шахті розташовано 14 рядів коробів, по 8 у кожному ряді. Кожна сушильна шахта має по одному вентилятору Ц9-57 № 8 або Ц4-70 № 8, які з'єднані з нею дифузорами з всмоктувальним коробом. Зерносушарка СЗШ-16 працює під розрідженням. Топка 2 з'єднана з сушильними шахтами повітроводом 15. Над кожною шахтою розташовуються надсушильні бункери 8 і 9. Надлишок матеріалу з бункерів зсипається через зливний самоплив 7 норій 5 або 6 для сирого зерна.

Зерносушарка має випускні механізми безперервної дії. Вони здійснюють безперервний рух з амплітудою коливання 4...20 мм та періодичний рух з амплітудою 135 мм (через кожні 4 хв).

Зерно охолоджується в охолоджувальній камері 11 та двох вертикальних бункерах 12 з перфорованими стінками та конусними днищами, шлюзовими затворами та вентиляційним обладнанням.

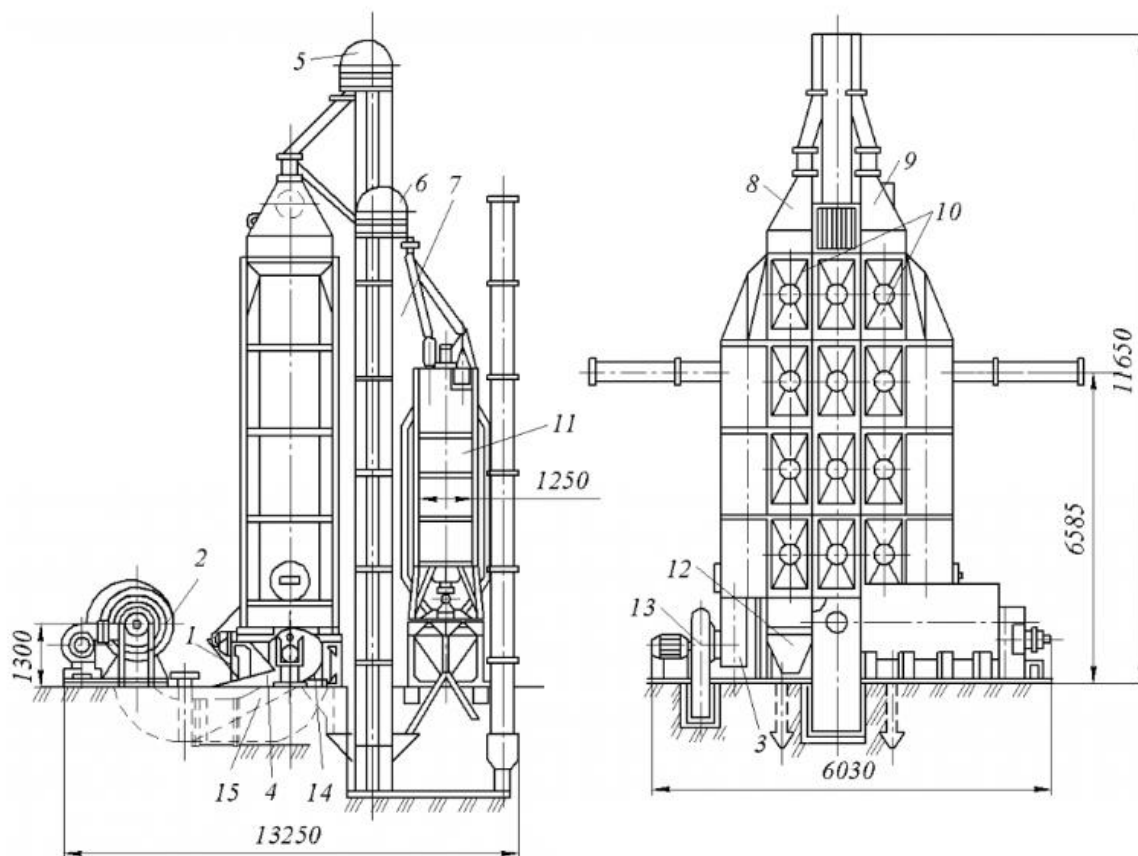


Рис. 1.2. Зерносушарка СШЗ-16

На рис. 1.3. зображено зерносушильний рециркуляційний агрегат РД-2-25-70, який призначений для сушіння пшениці, жита, вівса та ячменю. Складається з окремих секцій і має дві норії для рециркуляції зерна продуктивністю по 125 т/год. Кожен апарат зерносушарки включає камеру нагрівання 1 з вентилятором 5, бункер 4, завантажувальний пристрій 3, теплообмінник 7, шахти проміжного та остаточного охолодження 8 з вентиляторами 12, осадову камеру 2 з циклонами, безприводний випускний механізм 9, топку 11. У нижній частині бункера 4 встановлено завантажувальний пристрій 3, який служить для рівномірної подачі зерна в

камеру нагріву 1 і утворення зернової подушки. Камера нагрівання 1 з'єднана з камерою осаду 2 і складається по висоті з чотирьох секцій.

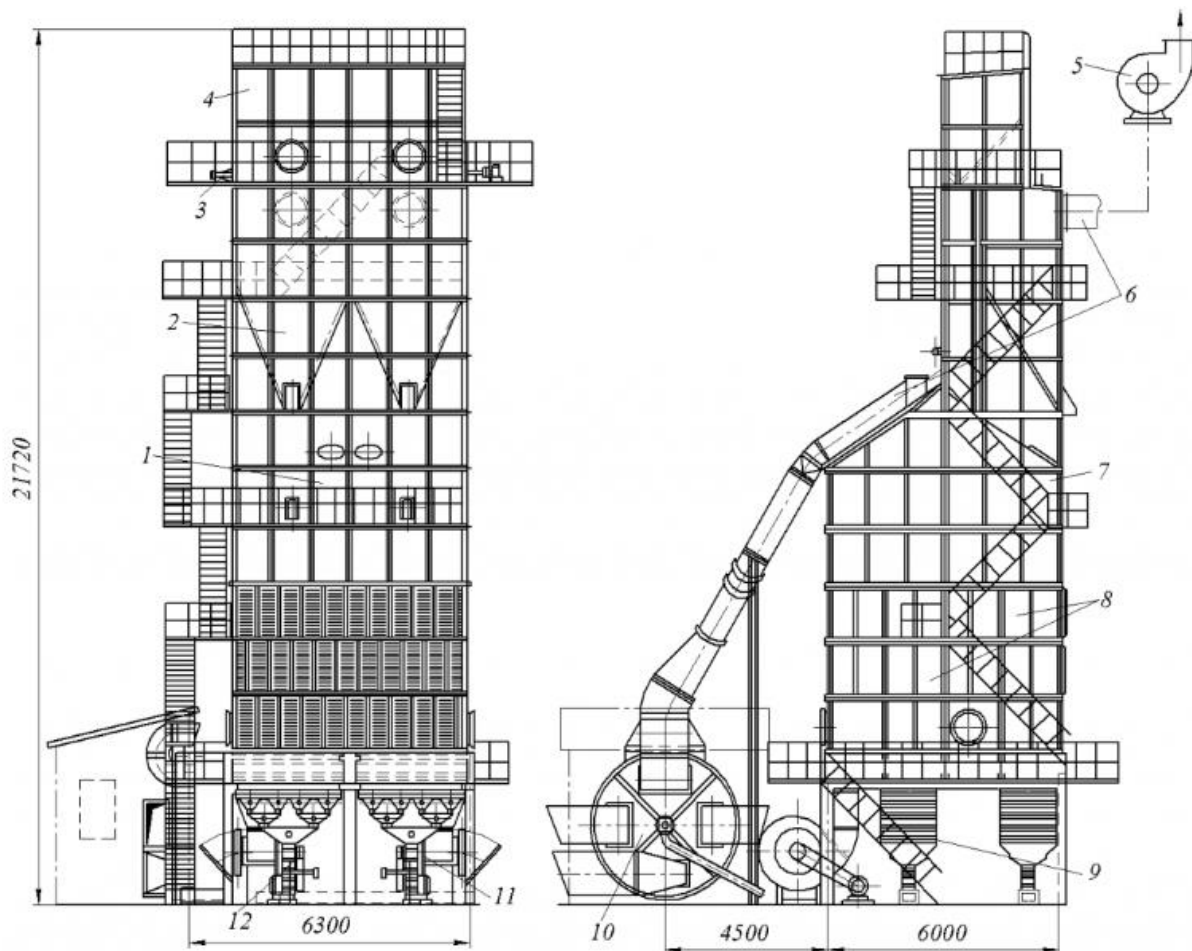


Рис. 1.3. Зерносушильний агрегат РД-2-25-70

Сушильний агент в камеру нагріву подають через дифузор, розташований в її нижній частині над термовологообмінником 7. Відпрацьований сушильний агент відводять з камери нагріву через осадову камеру вентилятором Ц9-55 № 8.

Одна з шахт 8 охолодження використовується за прямим призначенням, друга (рециркуляційна) призначена для часткового охолодження зерна і видалення вологи. Кожна з шахт складається з трьох ланок. У кожній шахті по 24 ряди коробів змінного перерізу, встановлених у шаховому порядку

касетами по 2 короби у кожній. Всього в шахті 52 підвідні короби і 14 напівкоробів, 56 відвідних коробів і 8 напівкоробів.

Зерносушарка ЗСПЖ-8 (рис. 1.4) безперервної дії, шахтного типу, призначена для сушіння пшениці, жита, вівса й інших зернових культур продовольчого призначення. Сушіння проводиться сумішшю повітря з топковими газами.

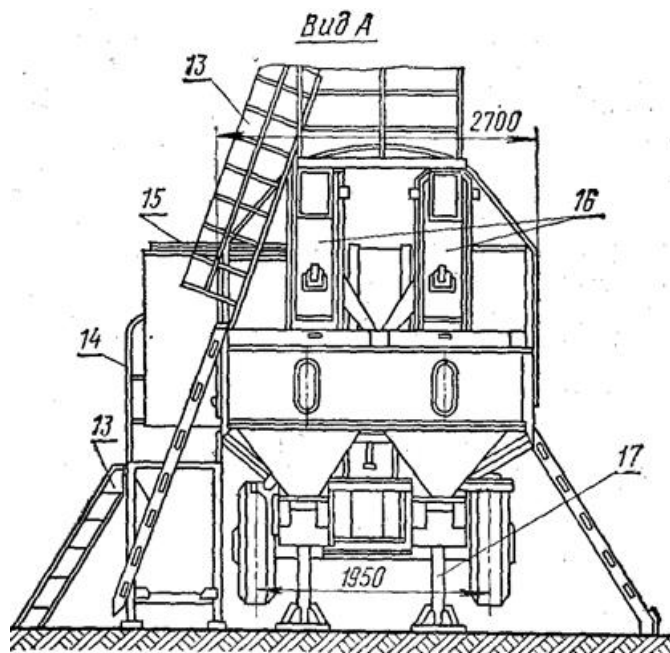


Рис. 1.4. Зерносушарка ЗСПЖ-8:

Сушильна частина сушарки складається з двох шахт із повітрярозподільним пристроєм, двох ковшових транспортерів, двох випускних механізмів, трьох гвинтових транспортерів, бункера для сирого зерна.

На рис. 1.5 зображено гібридну зерносушарку за патентом UA 121207. Вона має багатоканальну вертикальну структуру для руху зерна під дією гравітації. Кожен канал (траєкторія) обладнаний спеціальною системою відбивачів для оптимізації процесу сушіння. У верхній частині каналу розміщені поперечні відбивачі, які сприяють кращому розподілу зерна та контакту з сушильним агентом, а також мають пов'язані з ними бічні отвори. У нижній частині каналу розташовані поздовжні відбивачі, що чергуються



вхід 13 з атмосферою. Топку 16 і теплообмінник 5 з'єднує трубопровід 19, трубопровід 12 з'єднаний з вентилятором 20, що нагнітає нагріте повітря в підвідні короба 3, шахта 1 містить приймальний бункер 21 для подачі вологого зерна 22 і випускний механізм 23 періодичної дії для видалення висушеного зерна з нижньої частини шахти.

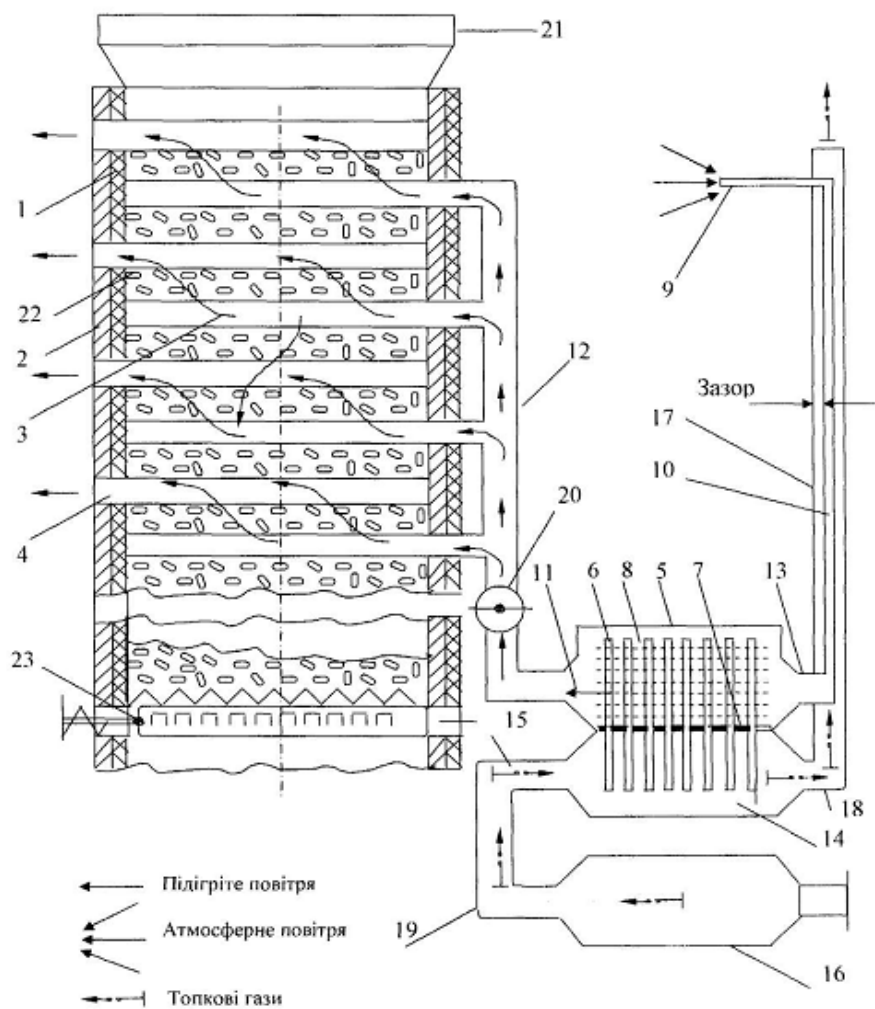


Рис. 1.6. Зерносушарка за патентом UA 64900

Дана зерносушарка містить теплоізоляційний елемент, зафіксований на зовнішній боковій поверхні шахти, а трубопровід повітряного каналу розміщений з зазором всередині труби, один кінець якої підключений до виходу газового каналу теплообмінника, а інший сполучений з атмосферою, підвідні і відвідні короби виконані з полімерного матеріалу, густиною 0,94-2,6

кг/м<sup>3</sup> та коефіцієнтом теплоємності 0,12-0,4 ккал/кг °С, топка виконана з відкритою верхньою частиною, а теплообмінник - з відкритою нижньою частиною, при цьому відкриті частини жорстко сполучені між собою по всьому периметру контакту топки і теплообмінника. Техніко-економічний результат від використання корисної моделі полягає в скороченні теплових втрат при роботі шахтної зерносушарки.

На рис. 1.7. представлено схематичне зображення зерносушарки Scolari SR. Головною особливістю сушарок цієї моделі є дві зони сушіння. Завдяки двозонному принципу дії забезпечується повне повторне використання всього повітря, що виходить з зони охолодження та середньої зони сушіння.

Колона зерносушарки розділена на чотири частини, в яких зерно проходить різні стадії сушіння:

- нижня зона – зона охолодження;
- середня зона – зона сушіння гарячим повітрям меншої температури;
- перехідна зона – зона відлежування зерна;
- верхня зона – зона сушіння гарячим повітрям високої температури.

Завдяки двозонному принципу дії, система рекуперації тепла від нижньої та середньої зон дозволяє повторно використовувати відпрацьоване повітря з залишковою температурою 60/70°С. Таке повітря підігрівається другим пальником та спрямовується у верхню зону шахти для інтенсивного сушіння зерна.

Центральна частина зерносушарки оснащена спеціальними бі-конічними повітроводами, які забезпечують рівномірне розповсюдження гарячого повітря по зерносушарці та перемішування зерна для досягнення рівномірної кінцевої вологості зерна.

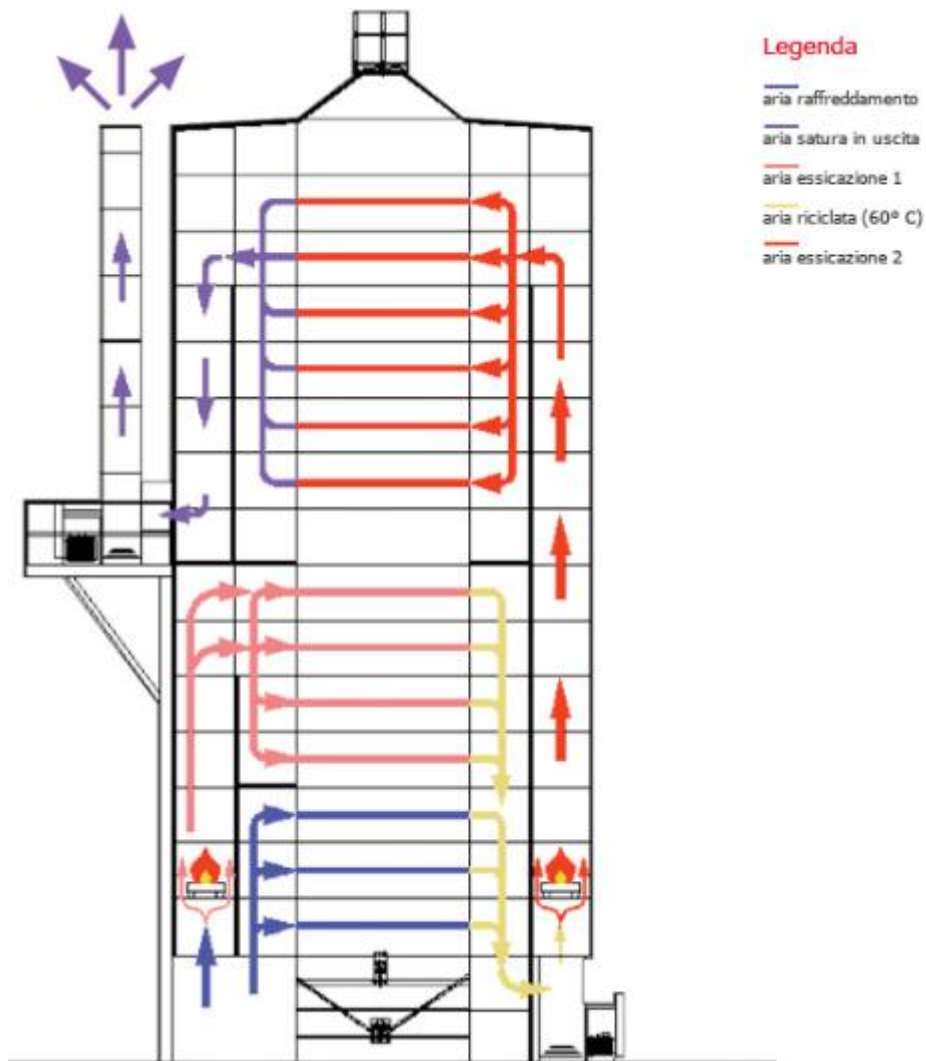


Рис. 1.7. Схематичне зображення зерносушарки Scolari SR

На рис. 1.8 зображено зерносушарку Scolari SC. Сушарка складається з: силосних секцій в верхній частині шахти, зони сушіння з бі-конічними повітроводами для рівномірного розповсюдження повітря, пальника, вентилятора для витягування повітря, зони охолодження (також з бі-конічними повітроводами), пневматичної системи вивантаження зерна та запобігання викиду в атмосферу зернового пилу, корпусу, даху, сходів та майданчика, електричної шафи з панеллю керування.

Принцип дії сушарки. Гаряче повітря надходить нагору по боковому повітроводу, де зерно ще вологе. Це не тільки покращує тепловий режим сушіння, а і дозволяє сушити такі пожежонебезпечні культури, як соняшник,

соє тощо. Боковий повітровод утеплений ззовні для зменшення теплообміну з довкіллям. Потім гаряче повітря заходить у бі-конічні повітроводи по всій ширині шахти. Завдяки особливій формі, бі-конічні повітроводи розповсюджують гаряче повітря по всій глибині, довжині та ширині сушильної шахти. Відпрацьоване повітря витягується відцентровим вентилятором.

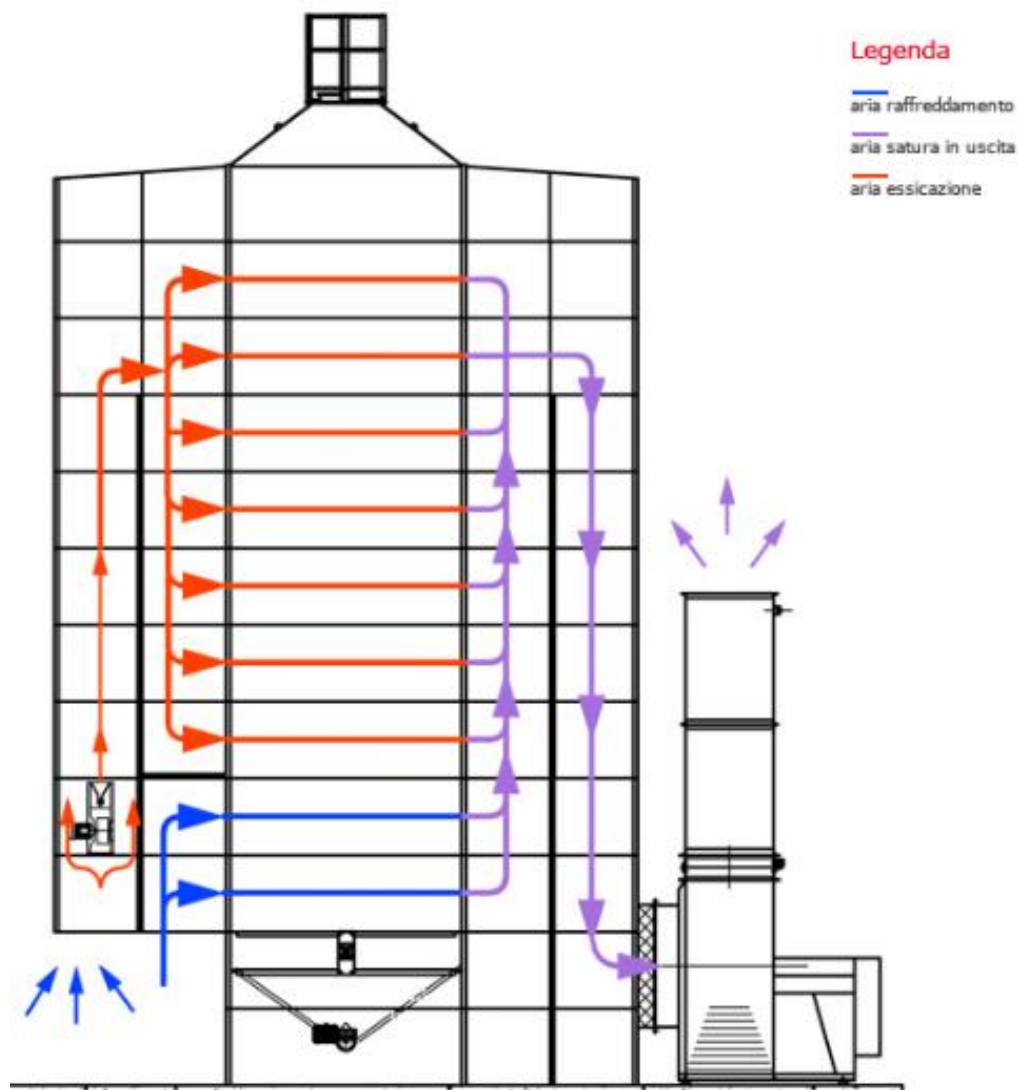


Рис. 1.8. Зерносушарка Scolari SC

На рис. 1.9 зображено порційну зерносушарку Scolari AR. При циклічному режимі роботи, зерно періодично відлежується в верхній частині шахти зерносушарки, щоб дати змогу внутрішній волозі вийти з зернівки назовні. Також, в процесі циркуляції та відлежування зерна, воно

ретельно переміщується, що забезпечують високий рівень гомогенізації кінцевої вологи.

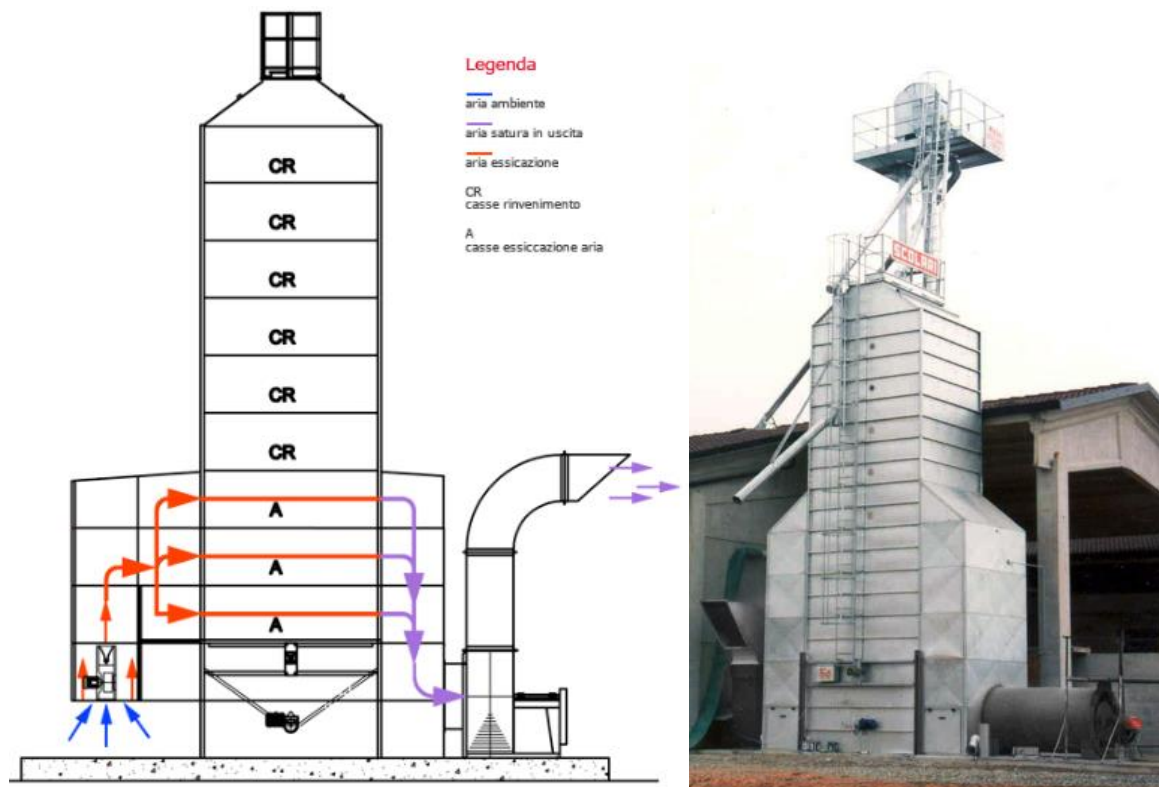


Рис. 1.9. Порційна зерносушарка Scolari AR

Зерносушарка Scolari AR складається з:

- нижньої частини центральної колони з бі-конічними повітроводами, що забезпечують рівномірне розповсюдження гарячого повітря по шахті для отримання гомогенної (рівномірної) кінцевої вологості;
- верхньої частини центральної колони, що призначена для відлежування зерна та гомогенізації вологи в ньому;
- пальника, що працює на газу або на дизельному паливі (з теплообмінником);
- системи для циркуляції зерна в процесі сушіння/охолодження та його вивантаження після закінчення сушіння/охолодження.

Потік повітря забезпечується відцентровим вентилятором, що працює на витягування повітря.

Принцип дії зерносушарки. Зерно завантажується в шахту зверху та повільно просувається донизу під дією сили тяжіння. Просування відбувається тоді, коли знизу зерносушарки відкривається вивантажувальний механізм (зазвичай на 1-2 хвилини, в залежності від типу зерна, вологості тощо). На цей час також перекриваються шиберні засувки вентиляторів для запобігання викиду пилу в атмосферу. Повітря просувається від міста забору повітря, через боковий повітровод гарячого повітря, через зернову шахту, та викидується в довкілля після бокового повітроводу відпрацьованого повітря. На різних стадіях сушіння повітря може бути гарячим або холодним.

Цикл сушіння в поточному режимі можна розподілити на декілька стадій:

1) Стадія завантаження. Пальники та вентилятори зерносушарки вимкнені, виконується тільки завантаження зерна в шахту.

2) Стадія сушіння. Вмикаються пальники та вентилятори зерносушарки, що забезпечують проходження гарячого повітря крізь зерно. В процесі проходження крізь зерно, повітря адсорбує вологу та виносить його назовні. Доки триває сушіння, зерно, що вивантажується із шахти знизу, за допомогою ковшової норії подається назад нагору і повертається в шахту для подальшого сушіння. В процесі повернення воно перемішується, що забезпечую рівномірну кінцеву вологість.

3) Стадія охолодження. Як тільки вологість зерна досягне необхідного значення, вимикаються пальники і зерносушарка продовжує проганяти (вже холодне) повітря крізь зерно. Так виконується охолодження зерна. Для підвищення продуктивності зерносушарки та для ще більшого покращення якості зерна, ця стадія може бути пропущена. В такому разі, сушіння буде виконуватись більш повільно в спеціальному охолоджуючому бункері.

4) Стадія вивантаження. Вимикаються вентилятори і зерно починає розвантажуватись із зерносушарки. На цей раз, зерно не повертається назад до

шахти, а викидується в бункер зберігання, бункер охолодження або іншу ємність, що запроектована по технології. Після чого, починається наступний цикл.

На рис. 1.10 зображено модульну зерносушарку СЗМ. Сушарка складається з наступних основних вузлів: сушильної камери, що складається з двох сушильних колон; завантажувального пристрою, встановленого над сушильною камерою; пристрою розвантажувального З, встановленого під сушильною камерою комплекту; пристроїв спалювання газу з вентиляторами.



Рис. 1.10. Модульна зерносушарка СЗМ

Кожна сушильна колонка по висоті складається із трьох секцій. Простір між колонками поділено на шість камер. До п'яти верхніх сушильних камер приєднані теплогенератори, а до нижньої охолоджувальної вентилятор охолодження. Для реверсування потоку зерна від внутрішньої стінки до зовнішньої між секціями колонок встановлені інвертори.

Робота сушарки починається із завантаження її сирим попередньо очищеним зерном. Завантаження сушарки продовжується до включення сигнальної лампочки датчиків верхнього рівня зерна на пульті керування. Після цього включаються вентилятори, запускаються пристрої спалювання газу, і відбувається сушіння сирого зерна, що знаходиться в колонках, протягом 20-30 хвилин,

Сушарка працює «сама на себе» (режим рециркуляції), для чого необхідно відкрити заслінку на перекидному клапані, що знаходиться після шнека розвантажувального пристрою, внаслідок чого зерно прямує в завантажувальний потік норії. Нагріте повітря вентиляторами нагнітається між колонами, протягується через сушильні секції та виходить назовні.

Зерно в сушильних колонках рухається зверху вниз під власною вагою при вивантаженні його розвантажувальним пристроєм. Регулювання продуктивності розвантажувального пристрою здійснюється за допомогою частотного перетворювача в залежності від початкової вологості зерна. Кінцева вологість зерна контролюється контрольно-діагностичним комплексом.

На рис. 1.11 зображено зерносушарку NDT 3-1. В сушарці є система активної рекуперації тепла - тепле повітря з нижніх секцій сушильної колони, яке не насичене вологою, направляється повторно на сушіння зерна. Сушарка може бути оснащена пиловловлювачем.

На рис. 1.12 та рис 1.13 зображено зерносушарки вітчизняних виробників. Двоступенчата зерносушарка змішаного потоку шахтного типу «NEZ 100» (рис. 1.12) від українського виробника «Новий Елеватор» та зерносушарка У13-СШ-100 (рис. 1.13) вітчизняного виробника «Лубнимаш».



Рис. 1.12. Зерносушарка  
NEZ 100



Рис. 1.11. Зерносушарка NDT 3-1

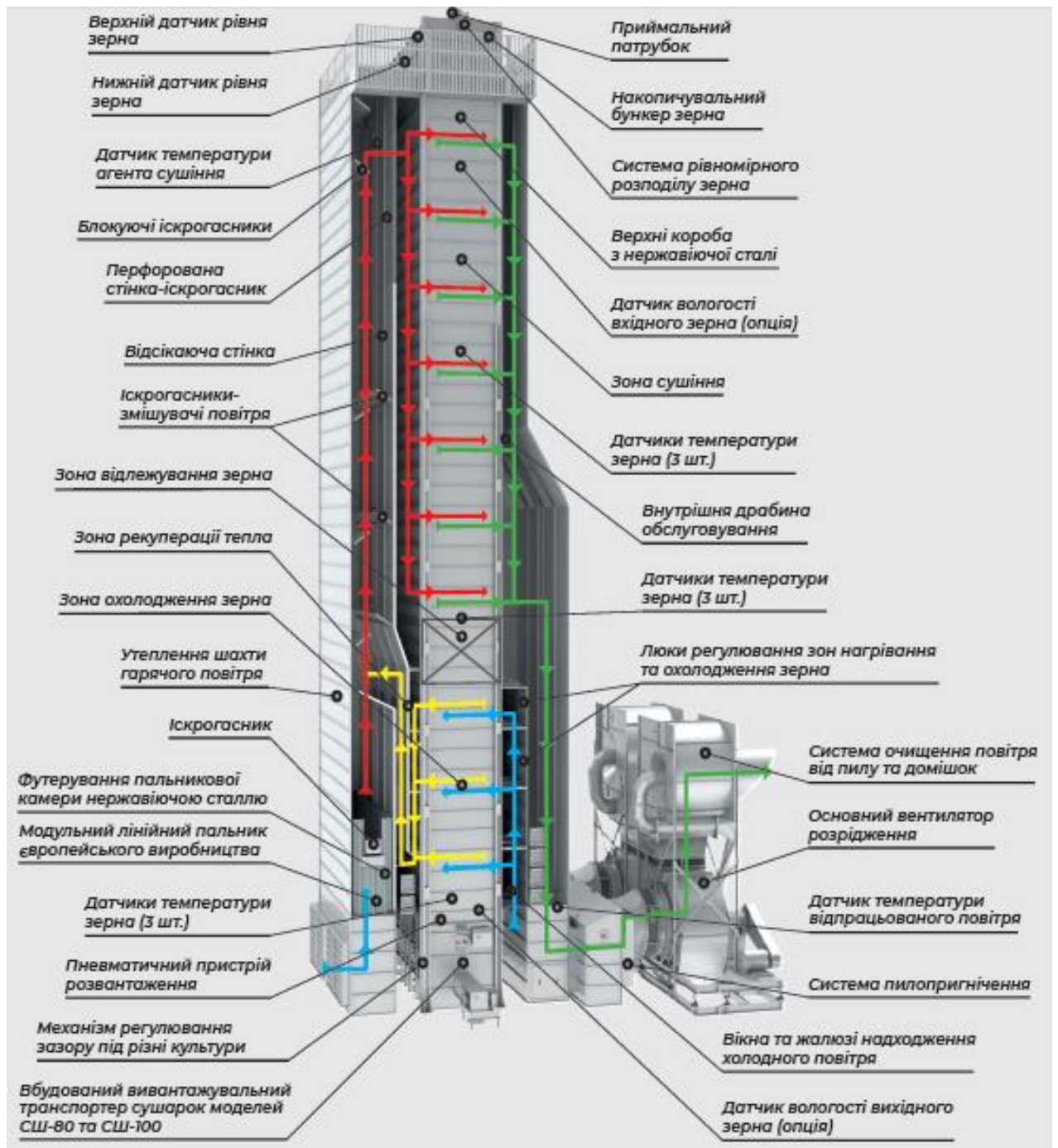


Рис. 1.13. Зерносушарка У13-СШ-100

## 2. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ, СОЦІАЛЬНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ

Шахтні зерносушарки є одним із найпоширеніших типів сушильного обладнання, що використовуються для зменшення вологості зерна до рівня, придатного для зберігання. Однак, зерносушарки мають певні недоліків, серед яких – надмірна витрата енергоносіїв, нерівномірне висушування зернової маси, часткові теплові втрати. Модернізація шахтних зерносушарок є об’єктивною потребою сучасного виробництва.

Технічна необхідність удосконалення зерносушарок полягає у наступному:

- застарілі конструкції не дозволяють ефективно контролювати процес сушіння – обмежене регулювання температури та вологості, високі тепловтрати;
- низька енергоефективність сушарок призводить до перевитрати палива та електроенергії;
- недостатня рівномірність сушіння зерна зумовлює технологічні втрати та погіршення якості продукції.

Таким чином, з технічної точки зору модернізація зерносушарки – це шлях до підвищення ефективності, надійності роботи та адаптивності виробництва.

Економічна необхідність удосконалення зерносушарок полягає у наступному:

- високі експлуатаційні витрати на старих зерносушарках зумовлені нераціональним використанням ресурсів (палива, електроенергії, робочого часу);
- зернові втрати внаслідок пересушування або псування через нерівномірність процесу сушіння суттєво впливають на прибутковість підприємства;

- оновлення парку обладнання дозволяє скоротити витрати на сушіння до 25–30% та зменшити втрати зерна на 1–2%, що є суттєвим у масштабах великих обсягів перероблення;

- окупність інвестицій у модернізацію зазвичай становить не більше 1–2 сезонів, особливо у період високих цін на енергоносії.

Отже, економічна доцільність модернізації очевидна – вона забезпечує стабільне скорочення витрат, зростання ефективності та прибутковості.

Соціальна необхідність удосконалення зерносушарки полягає у наступному:

- зниження екологічного навантаження – нові системи сушіння дозволяють скоротити викиди продуктів згоряння та запиленості, що покращує умови праці та екологічну ситуацію в регіоні;

- якісніше зерно – безпечніший продукт. Краще висушене зерно менше уражується грибками, має вищу зберезуваність, що позитивно впливає на продовольчу безпеку.

Таким чином, з соціальної точки зору модернізація зерносушарок сприяє не лише розвитку виробництва, а й підвищенню якості життя працівників та кінцевих споживачів.

### 3. ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНОЇ СИРОВИНИ І ГОТОВОГО ПРОДУКТУ

Зерно, як об'єкт сушіння в шахтних зерносушарках, є біологічним матеріалом, властивості якого суттєво впливають на кінетику процесу вологовидалення, енергоефективність сушіння та якість кінцевого продукту. Розглянемо детальніше основні характеристики вологого зерна.

*Вологість та її розподіл.* Початкова вологість зерна є визначальним фактором, що впливає на тривалість та інтенсивність процесу сушіння. Вона залежить від багатьох агротехнічних та погодних умов збирання врожаю. Наприклад: вологість свіжозібраної пшениці може коливатися в широкому діапазоні, від 15% при сприятливих умовах до 30% і вище при збиранні у вологу погоду, зерно кукурудзи часто має високу початкову вологість, яка може сягати 25-35% і більше, вологість насіння соняшнику зазвичай нижча, але також може варіюватися в межах 10-20% і вище.

Важливим аспектом є не лише середній вміст вологи в партії зерна, але й її розподіл між окремими зернинами та всередині кожної зернини. Нерівномірність вологості може призвести до нерівномірного сушіння, появи зон пересушеного або недосушеного зерна в шахтній сушарці.

*Хімічний склад зерна* визначає його харчову цінність, технологічні властивості та реакцію на теплову обробку. Основні компоненти включають:

- вуглеводи (крохмаль, цукри, клітковина): крохмаль є основним компонентом більшості злакових культур. Його вміст та структура можуть змінюватися під впливом високих температур;
- білки (протеїни): вміст білка варіюється залежно від культури та сорту. Білки можуть денатурувати при надмірному нагріванні, що погіршує якість зерна (наприклад, клейковину в пшениці);
- жири (олії): особливо високий вміст жирів мають олійні культури (соняшник, ріпак). Жири схильні до окислення та гідролізу при високих

температурах і вологості, що може призвести до згіршення та підвищення кислотного числа.

- мінеральні речовини, вітаміни, ферменти: ці компоненти присутні в менших кількостях, але також можуть зазнавати змін під час сушіння. Ферменти можуть впливати на біохімічні процеси в зерні.

*Деталізація фізичних властивостей:*

- Розмірно-масові характеристики. Лінійні розміри зернин: довжина, ширина та товщина зернин різних культур відрізняються і впливають на проходження повітряного потоку через шар зерна в шахтній сушарці. Маса 1000 зерен: цей показник є важливим для оцінки виповненості зерна та розрахунку продуктивності сушарки. Він залежить від виду культури, сорту та вологості.

- Сипкість та кут природного укосу. Ці властивості визначають рух зерна в шахтній сушарці та рівномірність його розподілу. Вологість може значно впливати на сипкість зерна, збільшуючи його злипання.

- Щільність. Істинна щільність - маса одиниці об'єму абсолютно сухої речовини зерна. Насипна щільність - маса одиниці об'єму зернової маси в вільному стані, враховуючи міжзерновий простір. Залежить від форми та розміру зернин, їх вологості та ступеня ущільнення.

- Теплофізичні характеристики. Питома теплоємність - кількість теплоти, необхідна для нагрівання одиниці маси зерна на один градус. Зі збільшенням вологості питома теплоємність зростає. Коефіцієнт теплопровідності - характеризує здатність зерна проводити тепло. Залежить від щільності, пористості та вологості. Коефіцієнт температуропровідності - характеризує швидкість вирівнювання температури в зернової масі. Коефіцієнт теплообміну з повітрям - визначає інтенсивність передачі тепла від сушильного агента до поверхні зерна.

- Аеродинамічні властивості. Швидкість витання - мінімальна швидкість повітряного потоку, при якій зернина знаходиться у зваженому стані.

Залежить від розміру, форми та щільності зерна. Опір зернового шару повітряному потоку - впливає на необхідну потужність вентиляційного обладнання сушарки. Опір залежить від висоти шару, щільності укладання зерна, його вологості та швидкості повітря.

*Біологічні та мікробіологічні аспекти:*

- Інтенсивність дихання: вологе зерно продовжує дихати, виділяючи тепло та вуглекислий газ. Інтенсивність дихання зростає зі збільшенням вологості та температури, що може призвести до самозігрівання.

- Активність мікроорганізмів: висока вологість створює сприятливі умови для розвитку пліснявих грибів та бактерій, які можуть погіршувати якість зерна, спричиняти його псування та утворення токсичних речовин.

Якість сушеного зерна є визначальним критерієм ефективності роботи шахтної зерносушарки. Досягнення оптимальних показників якості забезпечує збереження цінних властивостей зерна та його придатність для подальшого використання.

Для різних сільськогосподарських культур існують чітко визначені стандарти щодо кінцевої вологості зерна, що забезпечує його безпечне тривале зберігання без втрати якості. Наприклад:

- пшениця (продовольча) - базисна вологість зазвичай становить 14%;
- кукурудза (фуражна) - допустима вологість може бути вищою, наприклад, 14-15%;
- соняшник (олійний) - рекомендована вологість для зберігання часто становить 7-8%.

Точне дотримання цих норм є критично важливим для запобігання псуванню зерна.

Процес сушіння повинен бути проведений таким чином, щоб максимально зберегти природні властивості зерна. Контролюються наступні параметри:

- органолептичні показники. Колір - сушене зерно повинно зберігати природний колір, характерний для даної культури та сорту. Потемніння або поява ознак підгоряння є неприпустимими. Запах - зерно повинно мати свіжий, властивий йому запах без ознак плісняви, затхлості або інших сторонніх запахів, що свідчать про псування або неправильний режим сушіння.

- фізико-механічні властивості. Натура (маса 1000 зерен) - значне зниження натури може свідчити про втрату сухої речовини в процесі сушіння через надмірні температури або тривалість обробки. Травмованість зерна - неправильні режими сушіння можуть призвести до розтріскування оболонок зерна, що робить його більш вразливим до шкідників та хвороб під час зберігання.

- біохімічні показники. Вміст клейковини та її якість (для пшениці) - перегрів може негативно вплинути на кількість та пружність клейковини, що знижує хлібопекарські властивості борошна. Кислотне число жиру (для олійних культур) - підвищення кислотного числа свідчить про гідролітичне розщеплення жирів, що погіршує якість олії.

- біологічні властивості (для насінневого зерна). Схожість та енергія проростання - температура сушильного агента не повинна перевищувати критичних значень, щоб не знизити життєздатність насіння.

Досягнення рівномірної вологості в усій масі сушеного зерна є важливим фактором для його подальшого зберігання. Наявність ділянок з підвищеною вологістю може призвести до розвитку мікроорганізмів та псування всієї партії зерна. Шахтні зерносушарки повинні забезпечувати максимально рівномірне просушування зерна.

Контроль характеристик вихідної сировини та готового продукту є невід'ємною частиною технологічного процесу сушіння в шахтних зерносушарках. Ретельний аналіз цих параметрів дозволяє оптимізувати режими роботи сушарки, забезпечити високу якість сушеного зерна та мінімізувати втрати.

#### 4. ОПИС ЗАПРОПОНОВАНОГО ТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ. БУДОВА ТА ПРИНЦИП РОБОТИ ОБЛАДНАННЯ

Зерносушарка ДСП-32-ОТ (рис. 4.1) складається з двох паралельно працюючих шахт.

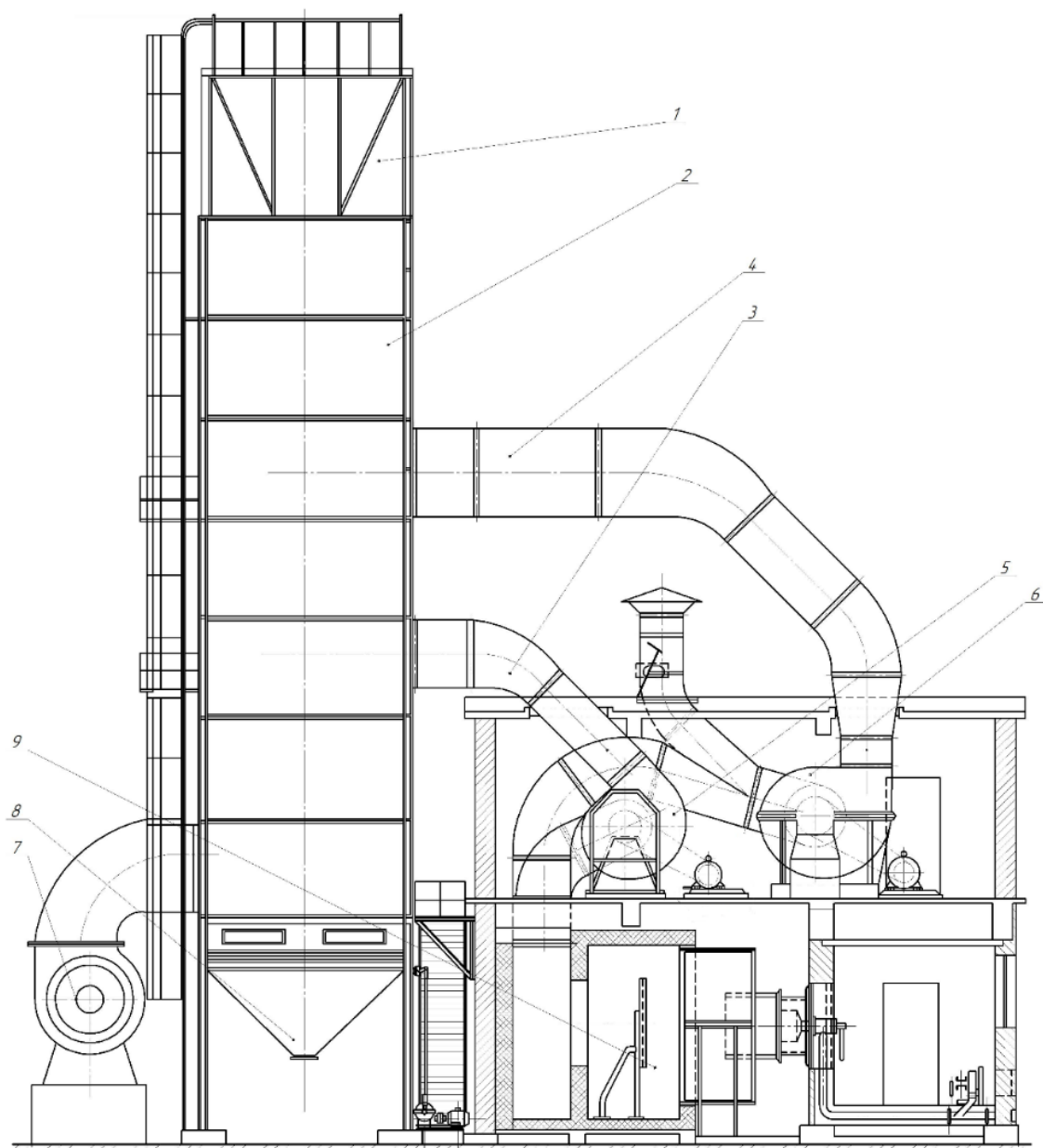


Рис. 4.1. Зерносушарка ДСП-32-ОТ:

1 – бункер; 2 – шахта; 3, 4 – повітропровід; 5, 6, 7 – вентилятор; 8 – днище;  
9 – топка

Шахта по висоті має підвідні та відвідні короби. Сушильний агент та холодне (атмосферне) повітря нагнітають вентиляторами у напірнорозподільні камери зон сушіння та охолодження.

Пропонується модернізувати зерносушарку ДСП-32-ОТ для роботи з двома контурами рециркуляції зерна. Модернізація полягає у наступному:

- встановити перегородку в надсушильному бункері;
- завантаження норій відбувається за допомогою труб, у які зерно подається самопливом.

Принцип роботи модернізованої зерносушарки ДСП-32-ОТ. Сире (вологе) зерно з проміжного бункера направляють в норію першого контуру рециркуляції, яка подає його в тепловологообмінник до повного заповнення шахт першого контуру рециркуляції та бункера до зливного пристрою. Далі заповнюють другий контур рециркуляції до верхнього зливного пристрою. Після цього включають вентилятори і топку. При цьому подачу сирого зерна припиняють, закривши засувку, і вмикають другу норію та випускні пристрої обох шахт. Зерно сушиться в шахтах до заданої вологості. При роботі зерносушарки регулюють випускні пристрої, забезпечуючи необхідну продуктивність та рівномірний рух зерна.

Після досягнення зерном заданої вологості в другому контурі рециркуляції відкривають заслінку на задану величину, що забезпечує подачу зерна в сушарку (перший контур), рівну його випуску на виході з 2-ї зони рециркуляції. Під час надходження сирого зерна в зерносушарку (перший контур) вона починає переповнюватися, з зливної самостічної труби в другому контурі рециркуляції просушене зерно направляється в елеватор (на зберігання).

## 5. РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

### Вихідні дані для розрахунку:

- продуктивність сушарки (в планових одиницях) –  $M_{пл} = 32$  т/год
- культура: пшениця;
- вологість зерна:
  - початкова (на вході в сушарку) –  $w_1 = 20$  %;
  - кінцева (на виході з зерносушарки) –  $w_2''' = 14$  %;
- температура зерна на вході в сушарку –  $\theta_1 = 10$  °С;
- параметри атмосферного повітря:
  - температура –  $t_0 = 10$  °С;
  - відносна вологість –  $\phi_0 = 60$  %
- сушарка працює на суміші повітря з продуктами згорання палива;
- режим сушіння зерна двоступеневий.

Свіже зерно вологістю  $w_1$  та температурою  $\theta_1$  надходить в надсушильний бункер і далі в сушильно-охолоджувальні шахти. В першу зону сушарки подається сушильний агент температурою  $t_1'$ , в другу – температурою  $t_1''$ , в зону охолодження зерна – атмосферне повітря температурою  $t_0$ . В першій зоні сушіння вологість зерна знижується до значення  $w_2'$ , в другій – до  $w_2''$ , в зоні охолодження зерна – до  $w_2'''$ . Температура зерна в першій зоні сушіння зростає до значення  $\theta_2''$ , а в зоні охолодження зерна знижується до значення  $\theta_2'''$ .

Виходячи із зазначеного для розрахунку сушарки задамося додатковими даними.

1. Температуру сушильного агента на вході в зони сушіння приймемо у відповідності з рекомендованим режимом сушіння зерна заданої культури в залежності від вологості зерна  $w_1$ :

- на вході в першу зону сушіння  $t_1' = 120$  °С;
- на вході в другу зону сушіння  $t_1'' = 140$  °С.

2. Гранично (максимально) допустиму температуру нагріву зерна на виході з другої зони сушіння прийmemo -  $\theta_2'' = 50^\circ\text{C}$ .

3. На основі досвіду експлуатації шахтних зерносушарок прийmemo наступні значення:

а) зниження вологості зерна:

- в першій зоні сушіння  $\Delta w' = 3\%$ ;
- в другій зоні сушіння  $\Delta w'' = 2,5\%$ ;

б) температуру зерна на виході з першої зони сушіння -  $\theta_2' = 30^\circ\text{C}$ ;

в) відносну вологість відпрацьованого сушильного агенту:

- на виході з першої зони сушіння -  $\varphi_2' = 90\%$ ;
- на виході з другої зони сушіння -  $\varphi_2'' = 80\%$ ;

г) температура зерна на виході з зони охолодження не повинна бути вище температури атмосферного повітря більш ніж на  $5-10^\circ\text{C}$ , тобто:

$$\theta_2''' \leq t_0 + (5 \div 10), ^\circ\text{C};$$

д) температуру відпрацьованого повітря на виході з зони охолодження зерна прийmemo в межах:

$$\theta_2''' \leq t_2''' \leq \frac{\theta_2'' + \theta_2'''}{2}, ^\circ\text{C};$$

е) питомі втрати теплоти в навколишнє середовище:

- для першої та другої зон сушіння -  $q_{0.c}' = q_{0.c}''$ , кДж/кг вип. вол.;
- для зони охолодження зерна -  $q_{0.c}^{\text{охл}}$ , кДж/кг вип. вол.

4. Характеристику палива вибираемо за довідниковими даними.

Тепловий розрахунок сушарки проводимо графоаналітичним методом із побудовою на I-d діаграмі процесу нагрівання атмосферного повітря шляхом змішування його з продуктами згоряння палива, процесів зміни стану сушильного агенту в зонах сушіння та атмосферного повітря в зоні охолодження зерна.

Розрахована зерносушарка має дві зони сушіння, що відрізняються температурою сушильного агенту. У зв'язку з цим визначаемо параметри сушильного агенту, що надходить у кожну із зон сушіння.

Розрахунок параметрів сушильного агента, що надходить у зони сушіння.

Визначаємо масу повітря, теоретично необхідного для спалювання 1 кг палива:

$$L_0^T = 0,115C^P + 0,346H^P - 0,043(O^P - S^P) = 0,115 \cdot 86,0 + 0,346 \cdot 13,7 - 0,043(0,1 - 0,1) = 14,63 \text{ кг с.в./кг}$$

де:  $C^P = 86,0 \%$ ,  $H^P = 13,7\%$ ,  $S^P = 0,1\%$ ,  $O^P + N_p = 0,2\%$  - масова частка вуглецю, водню, кисню та сірки та сірки у паливі.

Визначасмо загальний коефіцієнт надлишку повітря в агенті сушіння, що надходить у першу зону сушіння:

$$\alpha' = \frac{Q_B^P \cdot \eta_T + c_T \cdot t_T - \frac{9 H^P}{100} \cdot i'_P - \left(1 - \frac{9 H^P}{100}\right) \cdot c_{см} \cdot t'_1}{L_0^T \cdot \left(\frac{d_0 \cdot i'_P}{1000} - i_0 + c_{см} \cdot t'_1\right)}$$

де:  $\eta_T$  - ККД топки;

$i'_P$  - питома ентальпія пари в сушильному агенті:

$$i'_P = r_0 + c_P \cdot t'_1 = 2500 + 1,84 \cdot 120 = 2720,8 \text{ кДж/кг}$$

$r_0$  - теплота пароутворення;  $r_0 = 2500 \text{ кДж/кг}$

$t'_1$  - температура сушильного агента, яке подається в першу зону сушіння;

$c_{см}$  - питома теплоємність сухої суміші повітря з продуктами згорання палива;  $c_{см} = c_{с.в.} = 1,01 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$

$i_0$  - ентальпія атмосферного повітря, яке подається в топку, визначаємо по I-d діаграмі  $i_0 = 22 \text{ кДж/кг}$

$c_T$  - питома теплоємність палива;  $c_T = 1,7 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$

$t_T$  - температура палива;  $t_T = t_0$

$d_0$  - вологовміст атмосферного повітря, яке подається в топку, визначаємо по I-d діаграмі  $d_0 = 4,63 \text{ г/кг с. в.}$

Визначаємо вищу температуру згорання палива:

$$Q_B^p = 339 C^p + 1257 H^p - 109(O^p - S^p) = 339 \cdot 86,0 + 1257 \cdot 13,7 - 109(0,1 - 0,1) = 46374,9 \text{ кДж/кг}$$

$$\alpha' = \frac{Q_B^p \cdot \eta_T + c_T \cdot t_T - \frac{9 H^p}{100} \cdot i_{II}' - \left(1 - \frac{9 H^p}{100}\right) \cdot c_{cm} \cdot t_1'}{L_0^T \cdot \left(\frac{d_0 \cdot i_{II}'}{1000} - i_0 + c_{cm} \cdot t_1'\right)}$$

$$= \frac{46374,9 \cdot 0,96 + 1,7 \cdot 10 - \frac{9 \cdot 13,7}{100} \cdot 2720,8 - \left(1 - \frac{9 \cdot 13,7}{100}\right) \cdot 1,01 \cdot 120}{14,6302 \cdot \left(\frac{4,63 \cdot 2720,8}{1000} - 22 + 1,01 \cdot 120\right)}$$

$$= \frac{45071,2}{1462,84} = 25,2$$

Визначаємо вологовміст сушильного агента, який подається в першу зону сушіння:

$$d_1' = \frac{90 H^p + \alpha' \cdot L_0^T \cdot d_0}{1 + \alpha' \cdot L_0^T - \frac{9 H^p}{100}} = \frac{90 \cdot 13,7 + 25,2 \cdot 14,6302 \cdot 4,63}{1 + 25,2 \cdot 14,6302 - \frac{9 \cdot 13,7}{100}} = \frac{1830,02}{368,4} = 4,97 \text{ г/кг с. в.}$$

Аналогічно визначаємо загальний коефіцієнт надлишку повітря в сушильному агенті, що надходить у другу зону сушіння:

$$\alpha'' = \frac{Q_B^p \cdot \eta_T + c_T \cdot t_T - \frac{9 H^p}{100} \cdot i_{II}'' - \left(1 - \frac{9 H^p}{100}\right) \cdot c_{cm} \cdot t_1''}{L_0^T \cdot \left(\frac{d_0 \cdot i_{II}''}{1000} - i_0 + c_{cm} \cdot t_1''\right)}$$

$$= \frac{46374,9 \cdot 0,96 + 1,7 \cdot 10 - \frac{9 \cdot 13,7}{100} \cdot 2757,6 - \left(1 - \frac{9 \cdot 13,7}{100}\right) \cdot 1,01 \cdot 140}{14,6302 \cdot \left(\frac{4,63 \cdot 2757,6}{1000} - 22 + 1,01 \cdot 140\right)}$$

$$= \frac{41169,734}{1933,67} = 21,29$$

$$i_{II}'' = r_0 + c_{II} \cdot t_1'' = 2500 + 1,84 \cdot 140 = 2757,6 \text{ кДж/кг}$$

Вологовміст сушильного агента, що надходить у другу зону сушіння:

$$d_1'' = \frac{90 H^p + \alpha'' \cdot L_0^T \cdot d_0}{1 + \alpha'' \cdot L_0^T - \frac{9 H^p}{100}} = \frac{90 \cdot 13,7 + 21,29 \cdot 14,6302 \cdot 4,63}{1 + 21,29 \cdot 14,6302 - \frac{9 \cdot 13,7}{100}} = \frac{1565,44}{311,247} = 5,03 \text{ г/кг с. в.}$$

*Розрахунок процесу сушіння зерна*

Визначаємо продуктивність зерносушарки по свіжому (сирому) зерну у фізичних кг/год:

$$M_1 = \frac{M_{пл}}{K_B} = \frac{32000}{1} = 32000 \text{ кг/год}$$

де:  $K_B$  – коефіцієнт перерахунку маси просушеного зерна до планових тонн.

Далі відповідно до загальної методики розрахунку процесу сушіння визначаємо кількість (масу) вологи, що випаровується в кожній зоні сушіння:

у першій зоні:

$$W' = M_1 \cdot \frac{w_1 - w'_2}{100 - w'_2} = 32000 \frac{20 - 17}{100 - 17} = 1157 \text{ кг/год}$$

в другій зоні сушіння:

$$W'' = (M_1 - W') \cdot \frac{W'_2 - W''_2}{100 - W''_2} = (32000 - 1157) \cdot \frac{17 - 14,5}{100 - 14,5} = 902 \text{ кг/год}$$

Для визначення витрат повітря та теплоти в зонах сушіння відповідно до методики графоаналітичного розрахунку необхідно побудувати на I-d діаграмі процесу зміни стану сушильного агента в цих зонах (процеси сушіння). Для побудови процесів визначаємо різницю додавань та втрат теплоти в зонах сушіння:

$$\Delta' = c_{\text{вл}} \cdot \theta_1 - (q'_{\text{пр}} + q'_{\text{о.с}}) = 4,18 \cdot 10 - (1066,7 + 20) = -1044,9 \text{ кДж/кг вип. вол.}$$

де  $c_{\text{вл}}$  – питома теплоємність води,  $c_{\text{вл}} = 4,19 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$

$q'_{\text{пр}}$  – питомі втрати тепла на нагрівання зерна,

$$\begin{aligned} q'_{\text{пр}} &= \frac{100 - w_1}{w_1 - w'_2} \cdot c'_2 \cdot (\theta'_2 - \theta_1) = \frac{100 - 20}{20 - 17} \cdot 2 \cdot (30 - 10) \\ &= 1066,7 \text{ кДж/кг вип. вол.} \end{aligned}$$

де  $c'_2$  – питома теплоємність зерна при вологості  $w'_2$ , приблизно визначається по формулі зміщення:

$$c'_2 = \frac{c_{\text{с.в}} \cdot (100 - w'_2) + c_{\text{вл}} \cdot w'_2}{100} = \frac{1,55 \cdot (100 - 17) + 4,19 \cdot 17}{100} = 2 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$$

де  $c_{\text{с.в}}$  – питома теплоємність абсолютно сухої речовини зерна  $c_{\text{с.в}} = 1,55 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$

В другій зоні сушіння:

$$\begin{aligned} \Delta'' &= c_{\text{вл}} \cdot \theta'_2 - (q''_{\text{пр}} + q''_{\text{о.с}}) = 4,18 \cdot 30 - (1281,52 + 20) \\ &= -1176,12 \text{ кДж/кг вип. вол.} \end{aligned}$$

де

$$q''_{\text{пр}} = \frac{100 - w'_2}{w'_2 - w''_2} \cdot c''_2 \cdot (\theta''_2 - \theta'_2) = \frac{100 - 17}{17 - 14,5} \cdot 1,93 \cdot (50 - 30) \\ = 1281,52 \text{ кДж/кг вип. вол.}$$

$$c''_2 = \frac{c_{\text{с.в}} \cdot (100 - w''_2) + c_{\text{вл}} \cdot w''_2}{100} = \frac{1,55 \cdot (100 - 14,5) + 4,18 \cdot 14,5}{100} \\ = 1,93 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$$

На I-d діаграмі визначаємо довжину відрізків  $e'f'$  та  $e''f''$  в мм. Далі за формулами розраховуємо величини  $e'E'$  та  $e''E''$ , де  $m_d$  і  $m_i$  - масштаби вологовмісту та ентальпії на I-d діаграмі.

$$e'E' = e'f' \cdot \frac{\Delta'}{1000} \cdot \frac{m_d}{m_i} = 110 \cdot \frac{-1044,9}{1000} \cdot \frac{0,2}{0,5} = -45,76 \text{ мм}$$

$$e''E'' = e''f'' \cdot \frac{\Delta''}{1000} \cdot \frac{m_d}{m_i} = 121 \cdot \frac{-1176,12}{1000} \cdot \frac{0,2}{0,5} = -56,92 \text{ мм}$$

Визначаємо питомі витрати сухого повітря:

- в першій зоні сушіння:

$$l' = \frac{1000}{C'D' \cdot m_d} = \frac{1000}{114 \cdot 0,2} = 43,86 \text{ кг с. в./кг вип. вол.}$$

- в другій зоні сушіння:

$$l'' = \frac{1000}{C''D'' \cdot m_d} = \frac{1000}{133 \cdot 0,2} = 37,59 \text{ кг с. в./кг вип. вол.}$$

Масові витрати сухого повітря:

- в першій зоні сушіння

$$L' = l' \cdot W' = 43,86 \cdot 1157 = 50746 \text{ кг с. в./год}$$

- в другій зоні сушіння

$$L'' = l'' \cdot W'' = 37,59 \cdot 902 = 33907 \text{ кг с. в./год}$$

Об'ємні витрати сушильного агента, що надходить у зони сушіння:

- на вході в першу зону сушіння:

$$V'_1 = L' \cdot (v_0)'_1 = 50746 \cdot 3,818 = 193,7 \text{ м}^3/\text{год}$$

- на вході в другу зону сушіння

$$V_1'' = L'' \cdot (v_0)_1'' = 33,907 \cdot 2,399 = 81,34 \text{ м}^3/\text{год}$$

де  $(v_0)_1'$  та  $(v_0)_1''$  - питомий об'єм вологого повітря, віднесений до маси його сухої частини,  $\text{м}^3/\text{кг с. в.}$

Визначаємо питомі витрати теплоти у зонах сушіння:

- у першій зоні

$$q' = \frac{AF' \cdot m_i}{C'D' \cdot m_d} \cdot 1000 = \frac{224 \cdot 0,5}{144 \cdot 0,2} \cdot 1000 = 4912,28 \text{ кДж/кг вип. вол.}$$

- в другій зоні

$$q'' = \frac{AF'' \cdot m_i}{C''D'' \cdot m_d} \cdot 1000 = \frac{265 \cdot 0,5}{133 \cdot 0,2} \cdot 1000 = 4981,2 \text{ кДж/кг вип. вол.}$$

Загальна витрата теплоти:

- у першій зоні сушіння

$$Q' = q' \cdot W' = 4912,28 \cdot 1157 = 5683508 \text{ кДж/год}$$

- в другій зоні сушіння

$$Q'' = q'' \cdot W'' = 4981,2 \cdot 902 = 4493042 \text{ кДж/год}$$

Сумарні витрати теплоти у всій сушарці:

$$Q = Q' + Q'' = 5683508 + 4493042 = 10176550 \text{ кДж/год}$$

Питомі витрати теплоти на 1 кг випарюваної вологи:

$$q = \frac{Q}{W} = \frac{10176550}{2046,5} = 4,98 \text{ кДж/кг вип. вол.}$$

де  $W$  – загальна кількість випареної вологи в зерносушарці:

$$W = M_1 \cdot \frac{w_1 - w_2'''}{100 - w_2'''} = 32000 \frac{20 - 14,5}{100 - 14} = 2046,5 \text{ кг/год}$$

*Розрахунок процесу охолодження зерна*

Процес охолодження зерна супроводжується випаровуванням вологи.

Визначаємо кількість вологи, що випаровується:

$$\begin{aligned} W''' &= (M_1 - W' - W'') \cdot \frac{w_2'' - w_2'''}{100 - w_2'''} = (32000 - 1157 - 902) \cdot \frac{14,5 - 14}{100 - 14} \\ &= 174 \text{ кг/год} \end{aligned}$$

Для визначення витрати повітря на охолодження зерна відповідно до методики графоаналітичного розрахунку необхідно побудувати на I-d діаграмі процес зміни стану атмосферного повітря в зоні охолодження зерна.

Для побудови процесу визначаємо різницю додавань та втрат теплоти в зоні охолодження:

$$\begin{aligned}\Delta''' &= (c_{\text{вл}} \cdot \theta_2''' + q_{\text{пр}}''') - q_{\text{о.с}}''' = (4,18 \cdot 50 + 10721,7) - 20 \\ &= 10910,7 \text{ кДж/кг вип. вол.}\end{aligned}$$

де  $c_{\text{вл}}$  – витома теплоємність води,  $c_{\text{вл}} = 4,18 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$

$q_{\text{пр}}'$  - кількість теплоти, що віддається нагрітим зерном в процесі охолодження, в розрахунку 1 кг випарюваної вологи;

$$\begin{aligned}q_{\text{пр}}''' &= \frac{100 - w_2''}{w_2'' - w_2'''} \cdot c_2''' \cdot (\theta_2''' - \theta_2'') = \frac{100 - 14,5}{14,5 - 14} \cdot 1,9 \cdot (17 - 50) \\ &= -10721,7 \text{ кДж/кг вип. вол.}\end{aligned}$$

де  $c_2'''$  - питома теплоємність зерна при вологості  $w_2'''$ :

$$c_2''' = \frac{c_{\text{с.в}} \cdot (100 - w_2''') + c_{\text{вл}} \cdot w_2'''}{100} = \frac{1,55 \cdot (100 - 14) + 4,18 \cdot 14}{100} = 1,9 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$$

де  $c_{\text{с.в}}$  – питома теплоємність абсолютно сухої речовини зерна,  $c_{\text{с.в}} = 1,55 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$

Переходимо до побудови на I-d діаграмі процесу зміни стану атмосферного повітря в зоні охолодження (процесу охолодження зерна). На лінії постійної ентальпії  $l_0$ , що проходить через точку А, вибираємо довільну точку  $e'''$ . Проводимо через неї горизонтальну лінію до перетину з лінією  $do = \text{const}$  в точці  $f'''$ . Вимірюємо довжину відрізка  $e''' f'''$ .

Далі за формулою:

$$e''' E''' = e''' f''' \cdot \frac{\Delta'''}{1000} \cdot \frac{m_d}{m_i} = 28 \cdot \frac{10910,7}{1000} \cdot \frac{0,2}{0,5} = 122,2 \text{ мм}$$

Визначаємо питому витрату сухого повітря на охолодження зерна:

$$l''' = \frac{1000}{C''' D''' \cdot m_d} = \frac{1000}{12 \cdot 0,2} = 416,6 \text{ кг с. в./кг вип. вол.}$$

Масова витрата сухого повітря:

$$L''' = l''' \cdot W''' = 416,6 \cdot 147 = 61240 \text{ кг с. в./год}$$

Об'ємна витрата сушильного агента, що надходить до зони охолодження зерна:

$$V_1''' = L''' \cdot (v_0)_1''' = 61240 \cdot 0,8243 = 50480,3 \text{ м}^3/\text{год}$$

*Розрахунок витрати палива на сушіння зерна*

Визначаємо годинну витрату натурального палива:

$$B = \frac{Q}{Q_H^P \cdot \eta_T} = \frac{10176550}{42960 \cdot 0,97} = 244,2 \text{ кг/год}$$

де  $Q_H^P$  – нижча теплота згорання палива,  $Q_H^P = 42960 \text{ кДж/кг}$

$$\eta_T = 0,97$$

Годинна витрата умовного палива:

$$B_y = \frac{Q}{(Q_H^P)_y} = \frac{10176550}{29330} = 347,3 \text{ кг у. п./год}$$

де  $(Q_H^P)_y$  – нижча теплота згорання умовного палива.

$$(Q_H^P)_y = Q_B^P - 2500 \cdot \frac{9H^P}{100} = 46374,9 - 2500 \cdot \frac{9 \cdot 13,7}{100} = 43292,4 \text{ кДж/кг}$$

Питома витрата умовного палива на одну планову тону просушеного зерна:

$$b_y = \frac{B_y \cdot W_y}{W} = \frac{347,3 \cdot 69,77}{2046,5} = 11,84 \frac{\text{кг у. п.}}{\text{пл. т.}}$$

$W_y$  – кількість випареної вологи, що відповідає одній плановій тоні просушеного зерна:

$$W_y = 1000 \frac{20 - 14}{100 - 14} = 69,77 \text{ кг}$$

*Розрахунок основних розмірів сушильних та охолоджувальних камер зерносушарки.*

Основні габаритні розміри сушильно-охолоджувальних камер визначають, виходячи з розрахункової витрати сушильного агента та охолоджуючого повітря, необхідної кількості розподільних повітряних коробів і схеми їх розміщення всередині сушильно-охолоджувальних камер.

Розрахунок починають з визначення кількості відвідних коробів, оскільки існує обмеження швидкості відпрацьованого сушильного агента на виході з них. Щоб уникнути видування зерна з окремих коробів, середнє значення швидкості на виході з коробів не повинно бути більше 6 м/с.

Визначаємо об'ємну витрату відпрацьованого агента сушіння:  
у першій зоні сушіння:

$$V_2' = L' \cdot (v_0)'_2 = 50746 \cdot 0,9272 = 47051,7 \text{ м}^3/\text{год}$$

у другій зоні сушіння:

$$V_2'' = L'' \cdot (v_0)''_2 = 33907 \cdot 0,95 = 32211,6 \text{ м}^3/\text{год}$$

в зоні охолодження зерна:

$$V_2''' = L''' \cdot (v_0)'''_2 = 61240 \cdot 0,885 = 54197,4 \text{ м}^3/\text{год}$$

Загальна площа поперечного перерізу відвідних коробів:

у першій зоні сушіння:

$$F'_{\text{відв}} = \frac{V_2'}{Z \cdot 3600 \cdot v_{\text{вих}}} = \frac{47051,7}{2 \cdot 3600 \cdot 5,5} = 1,18 \text{ м}^2$$

де  $Z$  – кількість шахт в зерносушарці;  $Z = 2$  шт

$v_{\text{вих}}$  - середнє значення швидкості агента сушіння на виході з відвідних коробів;  $v_{\text{вих}} = 5,5 \text{ м/с}$

у другій зоні сушіння:

$$F''_{\text{відв}} = \frac{V_2''}{Z \cdot 3600 \cdot v_{\text{вих}}} = \frac{32211,6}{2 \cdot 3600 \cdot 5,5} = 0,82 \text{ м}^2$$

в зоні охолодження зерна:

$$F'''_{\text{отв}} = \frac{V_2'''}{Z \cdot 3600 \cdot v_{\text{вих}}} = \frac{54197,4}{2 \cdot 3600 \cdot 5,5} = 1,37 \text{ м}^2$$

Визначаємо кількість відвідних коробів (попереднє визначення):

у першій зоні сушіння:

$$N'_{\text{відв}} = \frac{F'_{\text{відв}}}{f_{\text{відв}}} = \frac{1,18}{0,00925} = 127,5 \text{ шт}$$

у другій зоні сушіння:

$$N''_{\text{відв}} = \frac{F''_{\text{відв}}}{f_{\text{відв}}} = \frac{0,82}{0,00925} = 88,7 \text{ шт}$$

в зоні охолодження зерна:

$$N'''_{\text{відв}} = \frac{F'''_{\text{відв}}}{f_{\text{відв}}} = \frac{1,37}{0,00925} = 148,1 \text{ шт}$$

Далі переходимо до визначення числа рядів коробів. Розрахунок числа рядів коробів і розподіл коробів по рядах, робимо з урахуванням отримання найбільш компактних і зручних розмірів шахти по висоті і довжині при більш рівномірному розподілі потоків сушильного агента по коробах.

Число рядів відвідних коробів:

у першій зоні сушіння:

$$n'_{\text{відв}} = \frac{N'_{\text{відв}}}{K} = \frac{127,5}{12} = 10,6 \text{ шт}$$

в другій зоні сушіння:

$$n''_{\text{відв}} = \frac{N''_{\text{відв}}}{K} = \frac{88,7}{12} = 7,4 \text{ шт}$$

в зоні охолодження зерна:

$$n'''_{\text{відв}} = \frac{N'''_{\text{відв}}}{K} = \frac{148,1}{12} = 12,3 \text{ шт}$$

де  $K$  – кількість коробів в одному ряду зерносушарки.

Отримані розрахункові значення  $n'_{\text{відв}}$ ,  $n''_{\text{відв}}$  та  $n'''_{\text{відв}}$  округляємо до найближчого більшого. Число рядів підвідних коробів приймаємо рівним округленому числу рядів відвідних коробів, тобто

$$n'_{\text{підв}} = n'_{\text{відв}} = 11; n''_{\text{підв}} = n''_{\text{відв}} = 8; n'''_{\text{підв}} = n'''_{\text{відв}} = 13$$

Загальна кількість рядів підвідних та відвідних коробів:

$$\text{у першій зоні сушіння: } n' = n'_{\text{підв}} + n'_{\text{відв}} = 22 \text{ шт}$$

$$\text{у другій зоні сушіння: } n'' = n''_{\text{підв}} + n''_{\text{відв}} = 16 \text{ шт}$$

$$\text{в зоні охолодження зерна: } n''' = n'''_{\text{підв}} + n'''_{\text{відв}} = 26 \text{ шт}$$

Знаючи крок коробів  $S_B = 200 \text{ мм}$ , визначаємо висоту відповідних зон зерносушарки:

$$\text{в першій зоні сушіння: } H'_{\text{ш}} = S_B \cdot n' = 200 \cdot 22 = 4400 \text{ мм}$$

$$\text{в другій зоні сушіння: } H''_{\text{ш}} = S_B \cdot n'' = 200 \cdot 16 = 3200 \text{ мм}$$

$$\text{в зоні охолодження зерна: } H'''_{\text{ш}} = S_B \cdot n''' = 200 \cdot 26 = 5200 \text{ мм}$$

Загальна розрахункова висота шахти:

$$H_{\text{ш}} = H'_{\text{ш}} + H''_{\text{ш}} + H'''_{\text{ш}} = 4400 + 3200 + 5200 = 12800 \text{ мм}$$

Визначаємо довжину шахт  $D_{\text{ш}}$ :

$$D_{\text{ш}} = S_{\text{г}} \cdot K = 200 \cdot 12 = 2400 \text{ мм}$$

де  $S_{\text{г}}$  – крок коробів по горизонталі;  $S_{\text{г}} = 200 \text{ мм}$

Ширину шахти  $V_{\text{ш}}$  приймемо  $V_{\text{ш}} = 1000 \text{ мм}$

Для підведення сушильного агента та охолоджуючого повітря в напірнорозподільчу камеру встановлюють дифузор з таким розрахунком, щоб швидкість сушильного агента та повітря на виході з дифузора в напірнорозподільчу камеру була в межах 8-10 м/с. Площа поперечного перерізу повітропроводів, що підводять сушильний агент та атмосферне повітря до шахт сушарки, розраховують, виходячи зі швидкості повітря в них у межах 10-15 м/с. Висоту надсушильного бункера вибирають, виходячи з умов виключення витоку сушильного агента. Висота шару зерна біля стін бункера має бути не менше 500 мм.

*Розрахунок тривалості перебування зерна в зонах сушіння та охолодження.*

Визначаємо об'єм однієї шахти сушарки:

$$V_{\text{ш}} = D_{\text{ш}} \cdot V_{\text{ш}} \cdot H_{\text{ш}} = 2,4 \cdot 1 \cdot 12,8 = 30,7 \text{ м}^3$$

Об'єм, який займає короби в шахті сушарки:

$$\sum V_{\text{кор}} = f_{\text{кор}} \cdot l_{\text{кор}} \cdot (n' + n'' + n''') \cdot K = 0,00925 \cdot 1 \cdot (11 + 8 + 13) \cdot 12 = 3,5 \text{ м}^3$$

Об'єм зерна, що одноразово перебуває в шахті:

$$V_{\text{з}} = V_{\text{ш}} - \sum V_{\text{кор}} = 30,7 - 3,5 = 27,2 \text{ м}^3$$

Маса зерна, що одноразово перебуває в шахті:

$$G_{\text{з}} = V_{\text{з}} \cdot \gamma_{\text{нас}} = 27,2 \cdot 750 = 20400 \text{ кг}$$

де  $\gamma_{\text{нас}}$  – насипна густина зерна пшениці  $\gamma_{\text{нас}} = 750 \text{ кг/м}^3$

Масу зерна в кожній зоні сушарці приймаємо пропорційно до її висоти, тобто:

у першій зоні сушіння:

$$G'_3 = G_3 \cdot \frac{H'_{ш}}{H_{ш}} = 20400 \cdot \frac{4400}{12800} = 7012,5 \text{ кг}$$

в другій зоні сушіння:

$$G''_3 = G_3 \cdot \frac{H''_{ш}}{H_{ш}} = 20400 \cdot \frac{3200}{12800} = 5100 \text{ кг}$$

в зоні охолодження:

$$G'''_3 = G_3 \cdot \frac{H'''_{ш}}{H_{ш}} = 20400 \cdot \frac{5200}{12800} = 8287,5 \text{ кг}$$

Визначаємо загальну тривалість перебування зерна у сушарці:

$$\tau = \frac{G_3}{M_{cp}} = \frac{20400}{15442} = 1,32 \text{ год}$$

де  $M_{cp}$  – середня витрата зерна в сушарці;

$$M_{cp} = \frac{M_1 + M_2}{2 \cdot Z} = \frac{32000 + 29768}{2 \cdot 2} = 15442 \text{ кг/год}$$

де  $M_2$  – кількість зерна на виході з охолоджувальної зони;

$$M_2 = M_1 \cdot \frac{100 - w_1}{100 - w_2} = 32000 \cdot \frac{100 - 20}{100 - 14} = 29768 \text{ кг/год}$$

Тривалість перебування зерна в зонах сушіння та охолодження:

- у першій зоні сушіння:

$$\tau' = \tau \cdot \frac{H'_{ш}}{H_{ш}} = 1,32 \cdot \frac{4400}{12800} = 0,45 \text{ год} \approx 27 \text{ хв}$$

- у другій зоні сушіння:

$$\tau'' = \tau \cdot \frac{H''_{ш}}{H_{ш}} = 1,32 \cdot \frac{3200}{12800} = 0,33 \text{ год} \approx 20 \text{ хв}$$

- в зоні охолодження зерна:

$$\tau''' = \tau \cdot \frac{H'''_{ш}}{H_{ш}} = 1,32 \cdot \frac{5200}{12800} = 0,53 \text{ год} \approx 32 \text{ хв}$$

## 6. ВИБІР КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Надійність, довговічність та ефективність шахтної зерносушарки значною мірою визначаються правильним вибором конструкційних матеріалів. Матеріали повинні відповідати умовам експлуатації, забезпечувати необхідну міцність, корозійну стійкість, термостійкість та гігієнічність.

*Матеріали для основних несучих конструкцій (каркас, бункер завантаження та вивантаження).* Основні несучі елементи шахтної зерносушарки зазнають значних статичних та динамічних навантажень від ваги зерна, вітрових навантажень, а також вібрацій від роботи вентиляторів та інших механізмів. Тому для їх виготовлення необхідно використовувати матеріали з високими показниками міцності та зварюваності.

Сталь конструкційна вуглецева звичайної якості (СтЗпс, СтЗкп). Ці марки сталі є найбільш економічно вигідними та мають достатню міцність для більшості елементів каркасу та бункерів, що не зазнають високих температур або агресивних середовищ. СтЗпс - сталь спокійна, характеризується кращою зварюваністю та меншою схильністю до крихкого руйнування порівняно з киплячою сталлю. Рекомендується для відповідальних несучих елементів. СтЗкп - сталь кипляча, має дещо нижчу вартість, але гіршу зварюваність та більшу схильність до крихкості. Може використовуватися для менш відповідальних елементів.

Для елементів, що працюють при підвищених навантаженнях або в умовах низьких температур, рекомендується використовувати низьколеговану сталь 09Г2С. Вона має вищу міцність, кращу зварюваність та стійкість до крихкого руйнування порівняно з вуглецевими сталями. Її використання може бути обґрунтованим для високих сушарок або регіонів з низькими зимовими температурами.

Для виготовлення каркасу використовуються стандартні профілі з зазначених марок сталей, що забезпечують необхідну жорсткість та міцність конструкції. Вибір розміру профілю залежить від розрахункових навантажень.

*Матеріали для внутрішніх елементів шахти (стінки, направляючі, розподільні пристрої).* Внутрішні елементи шахти безпосередньо контактують з зерном та гарячим сушильним агентом. Тому важливими вимогами до матеріалів є стійкість до абразивного зносу, корозійної дії вологого повітря та можливість забезпечення гігієнічності процесу.

Для виготовлення стінок шахти, направляючих та інших внутрішніх елементів може використовуватися листова сталь.

СтЗпс - забезпечує достатню міцність та зварюваність.

Сталь 08кп - має кращу пластичність та зварюваність, але дещо нижчу міцність. Може використовуватися для елементів, що не зазнають значних навантажень.

Сталь корозійностійка (нержавіюча) (AISI 304, 12X18H10T) - для зон підвищеної вологості або для сушіння харчового зерна, де гігієнічні вимоги є особливо високими, рекомендується використовувати корозійностійкі сталі аустенітного класу, такі як AISI 304 або 12X18H10T. Ці сталі мають високу стійкість до корозії у вологих середовищах та легко піддаються очищенню. Однак їх вартість є значно вищою. Використання нержавіючої сталі може бути виправданим для елементів, що безпосередньо контактують з зерном і потребують частого очищення.

Оцинкована сталь - як компромісний варіант між вартістю та корозійною стійкістю може розглядатися використання оцинкованої сталі для деяких внутрішніх елементів. Однак слід враховувати можливість пошкодження цинкового покриття в процесі експлуатації та його вплив на якість зерна.

*Матеріали для вентиляційного обладнання (корпус вентиляторів, повітроводи).* Вентилятори забезпечують циркуляцію сушильного агента

через шар зерна. Матеріали для їх виготовлення повинні бути стійкими до дії вологого повітря, абразивного зносу (особливо при наявності пилу в повітрі) та вібраційних навантажень.

Сталь листовая (СтЗпс, 08кп) - для корпусів вентиляторів та повітроводів може використовуватися звичайна листовая сталь, особливо якщо передбачається нанесення захисного антикорозійного покриття (фарбування, порошкове покриття).

Алюмінієві сплави (АМг2, АМц) - для виготовлення крильчаток вентиляторів часто використовуються легкі та корозійностійкі алюмінієві сплави. Вони забезпечують меншу інерцію та знижують навантаження на приводний двигун.

Оцинкована сталь - для повітроводів часто використовується оцинкована сталь, що забезпечує достатню корозійну стійкість при відносно невисокій вартості.

*Матеріали для теплоізоляції.* Теплоізоляція шахтної зерносушарки є важливим елементом для зниження теплових втрат та підвищення енергоефективності процесу сушіння.

Мінеральна вата (базальтова, скловолокно) - ці матеріали мають низьку теплопровідність, негорючість та стійкість до високих температур. Використовуються у вигляді плит або матів різної товщини.

Пінополіуретан (ППУ) - має дуже низький коефіцієнт теплопровідності та може наноситися методом наплення, забезпечуючи безшовну теплоізоляцію складних поверхонь. Однак деякі види ППУ є горючими.

Спінений поліетилен - має хороші теплоізоляційні властивості та вологостійкість, але меншу термостійкість порівняно з мінеральною ватою.

*Матеріали для ущільнень.* Для забезпечення герметичності з'єднань та надійності кріплення використовуються різні матеріали:

- гума (технічна, термостійка) - для ущільнення дверей, люків та інших рухомих з'єднань. Вибір марки гуми залежить від температурного режиму та контакту з агресивними середовищами;

- пароніт - використовується для ущільнення фланцевих з'єднань повітроводів та інших елементів, що працюють при підвищених температурах.

*Фарбувальні та захисні покриття.* Для захисту металевих поверхонь від корозії та впливу агресивних факторів застосовуються різні фарбувальні та захисні покриття:

- емалі та фарби (атмосферостійкі, термостійкі) - забезпечують захист від вологи, атмосферних впливів та помірних температур;

- цинкнаповнені фарби (холодне цинкування) - забезпечують ефективний катодний захист сталі від корозії.

- порошкове фарбування - створює стійке та довговічне покриття, стійке до механічних пошкоджень та корозії. Рекомендується для зовнішніх поверхонь та елементів, що піддаються інтенсивній експлуатації.

## 7. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ МАРШРУТ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ

У даному розділі кваліфікаційної роботи представлено технологічний маршрут виготовлення деталі «Кришка» (рис. 7.1).

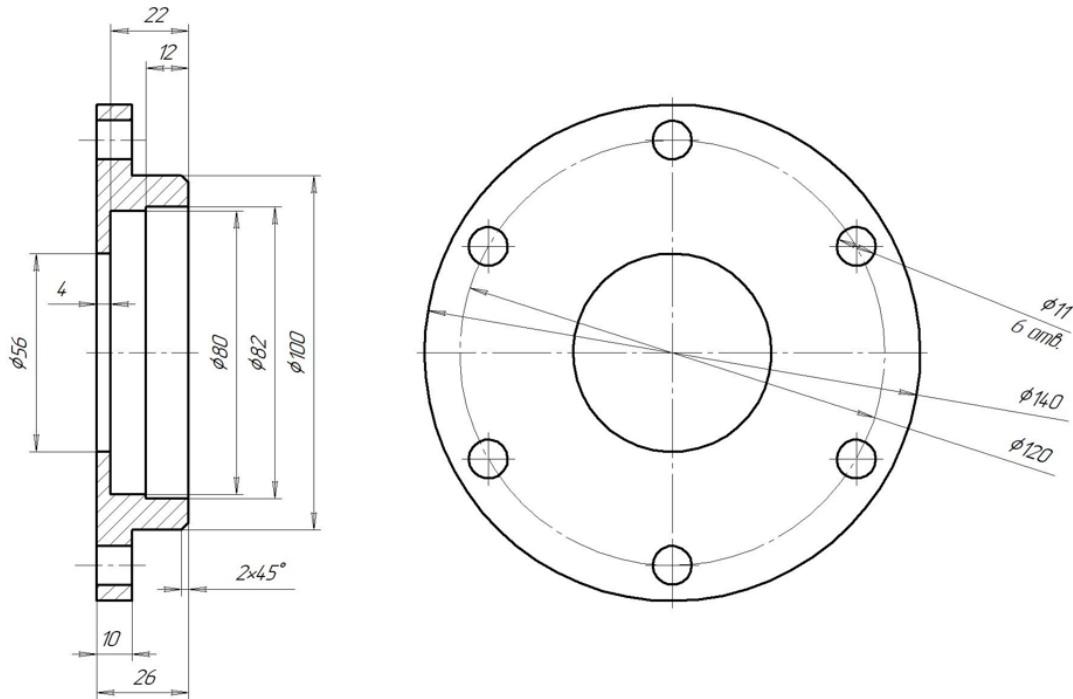


Рис. 7.1. Кресленик деталі «Кришка»

Деталь «Кришка» виготовляється зі сталі Сталь 20. Сталь 20 - це низьковуглецева конструкційна сталь, яка має хорошу пластичність, зварюваність, оброблюваність.

Таблиця 7.1. Хімічний склад сталі Сталь 20

Хімічний елемент	%
Кремній (Si)	0,17-0,37
Вуглець (C)	0,17-0,24
Марганець (Mn)	0,35-0,65
Фосфор (P)	до 0,03
Хром (Cr)	до 0,25
Сірка (S)	до 0,035
Нікель (Ni)	до 0,3

Заготовкою для виготовлення деталі «Кришка» є круглий прокат діаметром 150 мм. В таблиці 7.2 представлено розроблений технологічний маршрут виготовлення даної деталі.

Таблиця 7.2 Технологічний маршрут виготовлення деталі «Кришка»

Номер операції, переходу	Назва операції, переходу	Технологічне обладнання, пристрої, інструмент оброблювальний, контрольний
<b>10</b>	<b>Заготівельна</b> Відрізати заготовку Ø150 мм, довжиною 29 мм	Стрічкова пила по металу JET MBS-712
<b>20</b>	<b>Токарна</b> Установити, закріпити і зняти заготовку (УЗЗ)	Токарно-гвинторізний верстат 16К20, трикулачковий патрон
20.1	Торцювати пов.1 $z = 1,5$ мм	Різець правий упорний Т15К6, $\varphi=90^\circ$ , ШЦ-1
20.2	Точити пов.2 Ø100 мм довжиною $L = 16$ мм	Різець правий, прохідний, упорний Т15К6, $\varphi=90^\circ$ , ШЦ-1
20.3	Точити фаску $2 \times 45^\circ$ пов.3	Різець прохідний відігнутий правий, Т15К6, $\varphi=45^\circ$ , ШЦ-1
20.4	Центрувати пов.4	Свердло центрувальне Ø6 тип А, Р6М5
20.5	Свердлити отвір Ø26 мм довжиною $L = 27,5$ мм пов.5	Свердло Ø26, Р6М5, ШЦ-1
20.6	Розсвердлити отвір Ø26 мм до Ø56 мм довжиною $L = 27,5$ мм пов.6	Свердло Ø56, Р6М5, ШЦ-1
20.7	Розточити отв. Ø80 мм глибиною $L = 22$ мм пов.7	Різець розточувальний правий, Т15К6, $\varphi=45^\circ$ , ШЦ-1
20.8	Розточити отв. Ø82 мм глибиною $L = 12$ мм пов.8	Різець розточувальний правий, Т15К6, $\varphi=45^\circ$ , ШЦ-1
<b>30</b>	<b>Токарна</b> Установити, закріпити і зняти заготовку (УЗЗ)	Токарно-гвинторізний верстат 16К20, трикулачковий патрон

30.1	Торцювати пов.1 $z = 1,5$ мм	Різець правий упорний Т15К6, $\varphi=90^\circ$ , ШЦ-1
30.2	Точити пов.2 $\varnothing 140$ мм довжиною $L = 10$ мм	Різець правий упорний Т15К6, $\varphi=90^\circ$ , ШЦ-1
<b>40</b>	<b>Свердлильна</b> Установити, закріпити і зняти заготовку (УЗЗ)	Вертикально-свердлильний верстат 2А125
40.1	Свердлити отвір $\varnothing 11$ мм (6 отворів)	Свердло $\varnothing 11$ , Р6М5, ШЦ-1
<b>50</b>	<b>Промивна</b> Промити деталь	Промивальна машина
<b>60</b>	<b>Контрольна</b> Перевірити розміри деталі	Контрольний стіл

## Визначення поопераційних режимів різання і норм часу

### 20. Токарна

**Перехід 20.1** Торцювати пов.1 заготовки  $\varnothing 150$  на токарно-гвинторізному верстаті 16К20. Припуск на оброблення  $z = 1,5$  мм.

Вибираємо глибину різання, виходячи з виду обробки поверхні, діаметра заготовки припуску на оброблення та інструменту. Глибина різання становить  $t = z = 1,5$ мм.

По нормативним даним вибираємо подачу в залежності від діаметру заготовки, прийнятої глибини різання, розмірів тіла різця, оброблюваного матеріалу. При зовнішньому обробленні сталевих деталей діаметром до 150 мм з глибиною різання до 3 мм та перетином тіла різця  $16 \times 25$  мм подача повинна бути в інтервалі  $S = 0,4 \dots 0,5$  мм/об. За паспортними даними токарно-гвинторізного верстата 16К20 приймаємо подачу  $S_g = 0,5$  мм/об.

Визначаємо розрахункову швидкість різання:

$$V = \frac{C_V}{T^m \cdot t^x \cdot S^y}$$

де:  $T$  – середнє значення періоду стійкості, дискретна величина і можна приймати в межах 60... 90 хв для різців зі швидкорізальної сталі і 90... 120 хв для різця із твердосплавною різальною пластинкою;

$C_v$  – постійний коефіцієнт для даних режимів різання.

$$V = \frac{175}{120^{0,2} \cdot 1,5^{0,15} \cdot 0,5^{0,35}} = 80,56 \text{ м/хв}$$

Визначаємо розрахункову частоту обертання шпинделя верстата:

$$n_p = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D_3} = \frac{1000 \cdot 80,56}{3,14 \cdot 150} = 171,04 \text{ об/хв}$$

де:  $D_3$  – діаметр заготовки, мм;

Розрахункову кількість обертів  $n_p$  корегуємо за паспортними даними верстата. Із ряду обертів шпинделя верстату 16К20 вибираємо ближче менше значення  $n_6=160$  об/хв.

За прийнятим значенням  $n_6$  визначаємо фактичну швидкість різання:

$$V_d = \frac{\pi \cdot D \cdot n_B}{1000} = \frac{3,14 \cdot 150 \cdot 160}{1000} = 75,36 \text{ м/хв}$$

Визначаємо розрахункову довжину обробки:

$$L_p = L_d + L_1 + L_2 + L_3;$$

де:  $L_d = \frac{D_{\text{зар}}}{2} = \frac{150}{2} = 75$  мм – довжина оброблюваної поверхні;

$L_1 = 2$  мм – величина підводу різця;

$L_2 = t \cdot \text{ctg}\varphi = 1,5 \cdot \text{ctg}45^\circ = 1,5$  мм – врізання різця в заготовку, мм;

$L_3 = 0,5$  мм – величина перебігу різця.

$$L_p = 75 + 2 + 1,5 + 0,5 = 79 \text{ мм}$$

Основний час на виконання переходу:  $t_{01} = \frac{L}{n_B \cdot S} = \frac{79}{160 \cdot 0,5} = 0,99$  хв

Допоміжний час на виконання переходу:

$$t_{\text{доп1}} = t_{\text{вст}} + t_{\text{пер}} + t_{\text{зм}} + t_{\text{к}} = 0,16 + 0,1 + 0,06 + 0,24 = 0,56 \text{ хв}$$

де:  $t_{\text{вст}} = 0,16$  хв – допоміжний час, пов'язаний з встановленням в патрон;

$t_{\text{пер}} = 0,1$  хв – час, пов'язаний з переходом і встановленням різця по лімбу;

$t_{зм} = 0,06$  хв – допоміжний час на заміну частоти обертів шпинделя і подачі;

$t_{к} = 0,24$  хв – допоміжний час на контрольні вимірювання.

**Перехід 20.2.** Точити пов.2  $\varnothing 100$  мм,  $L = 16$  мм.

Загальна глибина різання при обробці заданої поверхні:

$$t = \frac{150 - 100}{2} = 25 \text{ мм}$$

Для обробки поверхні приймаємо подачу  $S_g = 0,5$  мм/об.

Визначаємо розрахункову швидкість різання:

$$V = \frac{C_V}{T^m \cdot t^x \cdot S^y} = \frac{150}{120^{0,2} \cdot 25^{0,15} \cdot 0,5^{0,35}} = 41,15 \text{ м/хв}$$

Визначаємо розрахункову частоту обертання шпинделя верстата:

$$n_p = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D_3} = \frac{1000 \cdot 41,15}{3,14 \cdot 150} = 87,37 \text{ об/хв}$$

де:  $D_{заг}$  – діаметр заготовки, мм;

Із ряду обертів шпинделя верстата вибираємо найближче менше значення  $n_g = 80$  об/хв. За прийнятим значенням  $n_g$  визначаємо фактичну швидкість різання:

$$V_d = \frac{\pi \cdot D \cdot n_B}{1000} = \frac{3,14 \cdot 150 \cdot 80}{1000} = 37,7 \text{ м/хв}$$

Визначаємо розрахункову довжину обробки:

$$L_p = L_0 + L_1 + L_2 + L_3;$$

де:  $L_0 = 16$  мм – довжина оброблюваної поверхні;

$L_1 = 2$  мм – величина підводу різця;

$L_2 = 25$  мм – величина врізання;

$L_3 = 0$  мм – величина перебігу різця.

$$L_p = 16 + 2 + 25 + 0 = 43 \text{ мм}$$

Основний час на виконання переходу:  $t_{02} = \frac{L}{n_B \cdot S} = \frac{43}{80 \cdot 0,5} = 1,08$  хв

Допоміжний час на виконання переходу:

$$t_{доп2} = t_{вст} + t_{пер} + t_{зм} + t_{к} = 0 + 0,1 + 0,03 + 0,24 = 0,37 \text{ хв}$$

де:  $t_{вст} = 0$  хв – деталь уже встановлена і затиснута;

$t_{пер} = 0,1$  хв – час, пов'язаний з переходом і встановленням різця по лімбу;

$t_{зм} = 0,03$  хв – допоміжний час на зміну частоти обертів шпинделя;

$t_{к} = 0,24$  хв – допоміжний час на контрольні вимірювання.

### **Перехід 20.3** Точити фаску $2 \times 45^\circ$ пов.3

Частота обертання шпинделя залишається такою самою, як і під час зовнішнього точіння для того, щоб не витратити час на перемикання швидкості. Витрачений час на точіння фаски приймаємо рівним  $t_{03} = 0,05$  хв

Допоміжний час на виконання переходу

$$t_{доп3} = t_{вст} + t_{пер} + t_{зм} + t_{к} = 0 + 0,1 + 0,11 + 0,24 = 0,45 \text{ хв}$$

де:  $t_{вст} = 0$  хв – деталь уже встановлена і затиснута;

$t_{пер} = 0,1$  хв – час пов'язаний з переходом і встановленням різця по лімбу з точністю  $< 0,2$  мм та автоматичному переміщенні супорта;

$t_{зм} = 0,06 + 0,05 = 0,11$  хв – допоміжний час на зміну різального інструменту;

$t_{к} = 0,24$  хв – допоміжний час на контрольні вимірювання.

### **Перехід 20.4** Центрувати пов.4

Знаходимо глибину різання:

$$t = \frac{D_{ц.св}}{2} = \frac{6}{2} = 3 \text{ мм}$$

де:  $D_{ц.св}$  – діаметр центровального свердла.

За нормативними даними вибираємо подачу залежно від найменшого діаметра отвора і міцностних характеристик матеріалу заготовки. При свердлінні сталевих деталей з  $\sigma_b < 800$  МПа подачу беремо  $S = 0,11 \dots 0,13$  мм/об. За паспортними даними токарно-гвинторізного верстата 16К20 приймаємо подачу  $S_6 = 0,125$  мм/об.

Визначаємо розрахункову швидкість різання:

$$V = \frac{C_V \cdot d_{св}^q}{T^m \cdot S_B^y} = \frac{7 \cdot 6^{0,2}}{45^{0,2} \cdot 0,125^{0,8}} = 24,7 \text{ м/хв}$$

де:  $T = 45$  хв – період стійкості центрувального свердла.

Визначаємо розрахункову частоту обертання шпинделя верстата

$$n_p = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot d_{св}} = \frac{1000 \cdot 24,7}{3,14 \cdot 6} = 1311 \text{ об/хв}$$

Із ряду обертів шпинделя верстату вибираємо ближче менше значення  $n_6 = 1250$  об/хв. Дійсна швидкість свердління:

$$V_d = \frac{\pi \cdot d_{св} \cdot n_B}{1000} = \frac{3,14 \cdot 6 \cdot 1250}{1000} = 23,5 \text{ м/хв}$$

Розрахункова довжина обробки:

$$L = l_d + l_1 + l_2 + l_3 = 6 + 3 + 2,5 = 11,5 \text{ мм}$$

де:  $l_d = 6$  мм - глибина свердління;

$l_1$ - відстань для підведення інструменту  $l_1 = 3$  мм;

$l_2, l_3$ - врізання і перебіг інструменту  $l_2 + l_3 = 2,5$  мм.

Основний час на виконання переходу:

$$t_{04} = \frac{L_3}{S_B \cdot n_B} = \frac{11,5}{0,125 \cdot 1250} = 0,07 \text{ хв}$$

9. Допоміжний час на виконання переходу:

$$t_{доп4} = t_{вст} + t_{зм} + t_k + t_{пер} = 0 + 0,12 + 0,24 + 0,43 = 0,79 \text{ хв}$$

де:  $t_{вст} = 0$  хв – деталь встановлена і затиснута;

$t_{зм} = 0,06 + 0,02 + 0,04 = 0,12$  хв – допоміжний час на встановлення свердла в задню бабку, зміну режимів роботи;

$t_k = 0,24$  хв – допоміжний час на контрольні вимірювання;

$t_{пер} = 0,43$  хв – допоміжний час, пов'язаний з роботою інструментом, встановленим в задній бабці.

**Перехід 20.5** Свердлити отвір  $\varnothing 26$  глибиною 27,5 пов.5

Визначаємо глибину свердління (врізання) виходячи з діаметра свердла:

$$t = \frac{D_{св}}{2} = \frac{26}{2} = 13 \text{ мм}$$

По нормативним даним вибираємо подачу в залежності від діаметру свердлильного отвору та міцнісних характеристик оброблювального матеріалу. Приймаємо подачу  $S_g = 0,2$  мм/об.

Визначаємо розрахункову швидкість різання:

$$V_c = \frac{5 \cdot d_{\text{св}}^{0.4}}{T^{0.2} \cdot S^{0.7}} = \frac{5 \cdot 26^{0.4}}{45^{0.2} \cdot 0,2^{0.7}} = 26,52 \text{ м/хв}$$

де:  $T = 45$  хв – середнє значення періоду стійкості свердла.

Визначаємо розрахункову частоту обертання шпинделя верстата:

$$n_p = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot d_{\text{св}}} = \frac{1000 \cdot 26,52}{3,14 \cdot 26} = 324,8 \text{ об/хв}$$

Із ряду обертів шпинделя верстата 16К20 вибираємо ближче менше значення  $n_g = 315$  об/хв. Дійсна швидкість свердління:

$$V_d = \frac{\pi \cdot d_{\text{св}} \cdot n_B}{1000} = \frac{3,14 \cdot 26 \cdot 315}{1000} = 25,71 \text{ м/хв}$$

Розрахункова довжина обробки

$$L = l_d + l_1 + l_2 + l_3 = 27,5 + 3 + 5 = 35,5 \text{ мм}$$

де:  $l_d = 27,5$  мм – глибина різання;

$l_1$  – підвід інструменту  $l_1 = 3$  мм;

$l_2, l_3$  – врізання і перебіг інструменту  $l_2 + l_3 = 5$  мм.

Основний час на виконання переходу:

$$t_{05} = \frac{\pi \cdot L}{S_B \cdot n_B} = \frac{3,14 \cdot 35,5}{0,2 \cdot 315} = 1,77 \text{ хв}$$

Допоміжний час на виконання переходу:

$$t_{\text{доп5}} = t_{\text{вст}} + t_{\text{зм}} + t_{\text{к}} + t_{\text{пер}} = 0 + 0,12 + 0,43 + 0,24 = 0,79 \text{ хв}$$

де:  $t_{\text{вст}} = 0$  хв – деталь встановлена і затиснута;

$t_{\text{зм}} = 0,06 + 0,02 + 0,04 = 0,12$  хв – допоміжний час на зміну частоти обертів шпинделя і подачі, а також на встановлення свердла в задню бабку;

$t_{\text{к}} = 0,24$  хв – допоміжний час на контрольні вимірювання;

$t_{\text{пер}} = 0,43$  хв – допоміжний час, пов'язаний з роботою інструментом, встановленим в задній бабці.

## Перехід 20.6 Розсвердлити отвір Ø26 на Ø56 глибиною 27,5 мм пов.6

Визначаємо глибину свердління (врізання) виходячи з діаметра свердла:

$$t = \frac{56 - 26}{2} = \frac{30}{2} = 15 \text{ мм}$$

По нормативним даним вибираємо подачу в залежності від діаметру свердлильного отвору та міцнісних характеристик оброблювального матеріалу. Приймаємо подачу  $S_e = 0,2$  мм/об.

Визначаємо розрахункову швидкість різання:

$$V_c = \frac{5 \cdot d_{\text{св}}^{0.4}}{T^{0.2} \cdot S^{0.7}} = \frac{5 \cdot 56^{0.4}}{45^{0.2} \cdot 0,2^{0.7}} = 36,05 \text{ м/хв}$$

Визначаємо розрахункову частоту обертання шпинделя верстата:

$$n_p = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot d_{\text{св}}} = \frac{1000 \cdot 36,05}{3,14 \cdot 56} = 205,01 \text{ об/хв}$$

Із ряду обертів шпинделя верстату вибираємо ближче менше значення  $n_B = 200$  об/хв. Дійсна швидкість свердління:

$$V_d = \frac{\pi \cdot d_{\text{св}} \cdot n_B}{1000} = \frac{3,14 \cdot 56 \cdot 200}{1000} = 35,17 \text{ м/хв}$$

Розрахункова довжина обробки:

$$L = l_d + l_1 + l_2 + l_3 = 27,5 + 3 + 5 = 35,5 \text{ мм}$$

де:  $l_d = 27,5$  мм – глибина різання;

$l_1$  – підвід інструменту  $l_1 = 3$  мм;

$l_2, l_3$  – врізання і перебіг інструменту  $l_2 + l_3 = 5$  мм.

Основний час на виконання переходу:

$$t_{06} = \frac{\pi \cdot L}{S_B \cdot n_B} = \frac{3,14 \cdot 35,5}{0,2 \cdot 200} = 2,79 \text{ хв}$$

Допоміжний час на виконання переходу:

$$t_{\text{доп6}} = t_{\text{вст}} + t_{\text{зм}} + t_{\text{к}} + t_{\text{пер}} = 0 + 0,1 + 0,24 + 0,43 = 0,77 \text{ хв}$$

де:  $t_{\text{вст}} = 0$  хв – деталь встановлена і затиснута;

$t_{\text{зм}} = 0,06 + 0,04 = 0,1$  хв – допоміжний час на зміну частоти обертів шпинделя, а також на встановлення свердла в задню бабку;

$t_{\text{к}} = 0,24$  хв – допоміжний час на контрольні вимірювання;

$t_{\text{пер}} = 0,43$  хв – допоміжний час, пов'язаний з роботою інструментом, встановленим в задній бабці.

### Перехід 20.7 Розточити отвір $\varnothing 80$ довжиною $L = 22$ мм пов.7

Загальна глибина різання при обробці даної поверхні:

$$t = \frac{80 - 56}{2} = 12 \text{ мм}$$

Подача при розточуванні подача повинна знаходитись у межах  $S = 0,1 \dots 0,2$  мм/об. За паспортним даним токарно-гвинторізного верстата 16К20 приймаємо подачу  $S_g = 0,15$  мм/об.

Визначаємо розрахункову швидкість різання:

$$V = \frac{C_V}{T^m \cdot t^x \cdot S^y} = \frac{230}{120^{0,3} \cdot 12^{0,1} \cdot 0,15^{0,25}} = 68,55 \text{ м/хв}$$

Визначаємо розрахункову частоту обертання шпинделя верстата:

$$n_p = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D_3} = \frac{1000 \cdot 68,55}{3,14 \cdot 56} = 389,84 \text{ об/хв}$$

Із ряду обертів шпинделя верстату вибираємо найближче менше значення  $n_g = 315$  об/хв. За прийнятим значенням  $n_g$  визначаємо фактичну швидкість різання:

$$V_d = \frac{\pi \cdot D_3 \cdot n_B}{1000} = \frac{3,14 \cdot 56 \cdot 315}{1000} = 55,38 \text{ м/хв}$$

Визначаємо розрахункову довжину обробки:

$$L_p = L_0 + L_1 + L_2 + L_3;$$

де:  $L_0 = 22$  мм – довжина оброблюваної поверхні;

$L_1 = 2$  мм – величина підводу різця;

$L_2 = 12$  мм – величина врізання;

$L_3 = 2$  мм – величина перебігу різця.

$$L_p = 22 + 2 + 12 + 2 = 38 \text{ мм}$$

Основний час на виконання переходу:  $t_{07} = \frac{L}{n_B \cdot S} = \frac{38}{315 \cdot 0,15} = 0,8$  хв

Допоміжний час на виконання переходу:

$$t_{\text{доп7}} = t_{\text{вст}} + t_{\text{пер}} + t_{\text{зм}} + t_{\text{к}} = 0 + 0,1 + 0,12 + 0,24 = 0,46 \text{ хв}$$

де:  $t_{\text{вст}} = 0$  хв – деталь уже встановлена і затиснута;

$t_{\text{пер}} = 0,1$  хв – час пов'язаний з переходом і встановленням різця по лімбу з точністю  $<0,2$  мм та автоматичному переміщенні супорта;

$t_{\text{зм}} = 0,06 + 0,06 = 0,12$  хв – допоміжний час на зміну частоти обертів шпинделя і подачі, різального інструменту;

$t_{\text{к}} = 0,24$  хв – допоміжний час на контрольні вимірювання.

**Перехід 20.8** Розточити отвір  $\varnothing 82$  довжиною  $L = 12$  мм пов.8

Загальна глибина різання при обробці даної поверхні:

$$t = \frac{82 - 80}{2} = 1 \text{ мм}$$

Подача при розточуванні повинна знаходитись у межах  $S = 0,1 \dots 0,2$  мм/об. За паспортним даним токарно-гвинторізного верстата 16К20 приймаємо подачу  $S_8 = 0,15$  мм/об.

Визначаємо розрахункову швидкість різання:

$$V = \frac{C_V}{T^m \cdot t^x \cdot S^y} = \frac{230}{120^{0,3} \cdot 1^{0,1} \cdot 0,15^{0,25}} = 87,9 \text{ м/хв}$$

Визначаємо розрахункову частоту обертання шпинделя верстата:

$$n_p = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D_3} = \frac{1000 \cdot 87,9}{3,14 \cdot 80} = 349,92 \text{ об/хв}$$

Із ряду обертів шпинделя верстату вибираємо найближче менше значення  $n_8 = 315$  об/хв. За прийнятим значенням  $n_8$  визначаємо фактичну швидкість різання:

$$V_D = \frac{\pi \cdot D_3 \cdot n_B}{1000} = \frac{3,14 \cdot 80 \cdot 315}{1000} = 79,13 \text{ м/хв}$$

Визначаємо розрахункову довжину обробки:

$$L_p = L_0 + L_1 + L_2 + L_3;$$

де:  $L_0 = 12$  мм – довжина оброблюваної поверхні;

$L_1 = 2$  мм – величина підводу різця;

$L_2 = 1$  мм – величина врізання;

$L_3 = 1$  мм – величина перебігу різця.

$$L_p = 12 + 2 + 1 + 1 = 16 \text{ мм}$$

Основний час на виконання переходу:  $t_{08} = \frac{L}{n_B \cdot S} = \frac{16}{315 \cdot 0,15} = 0,34 \text{ хв}$

Допоміжний час на виконання переходу:

$$t_{\text{доп8}} = t_{\text{вст}} + t_{\text{пер}} + t_{\text{зм}} + t_{\text{к}} = 0 + 0,1 + 0 + 0,24 = 0,34 \text{ хв}$$

де:  $t_{\text{вст}} = 0 \text{ хв}$  – деталь уже встановлена і затиснута;

$t_{\text{пер}} = 0,1 \text{ хв}$  – час пов'язаний з переходом і встановленням різця по лімбу з точністю  $<0,2 \text{ мм}$  та автоматичному переміщенні супорта;

$t_{\text{зм}} = 0 \text{ хв}$  – допоміжний час на зміну частоти обертів шпинделя і подачі, різального інструменту;

$t_{\text{к}} = 0,24 \text{ хв}$  – допоміжний час на контрольні вимірювання.

### **30. Токарна**

**Перехід 30.1** Торцювати пов.1, припуск на оброблення  $z = 1,5 \text{ мм}$ .

Глибина різання  $t = z = 1,5 \text{ мм}$ . За паспортним даним токарно-гвинторізного верстата 16К20 приймаємо подачу  $S_g = 0,5 \text{ мм/об}$ .

Визначаємо розрахункову швидкість різання:

$$V = \frac{C_V}{T^m \cdot t^x \cdot S^y}$$

де:  $T$  – середнє значення періоду стійкості інструмента, хв.;

$C_V$  – постійний коефіцієнт для даних режимів різання;

$$V = \frac{175}{120^{0,2} \cdot 1,5^{0,15} \cdot 0,5^{0,35}} = 80,5 \text{ м/хв}$$

Визначаємо розрахункову частоту обертання шпинделя верстата:

$$n_p = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D_3} = \frac{1000 \cdot 80,5}{3,14 \cdot 150} = 170,91 \text{ об/хв}$$

де:  $D_3$  – діаметр заготовки, мм;

Розрахункову кількість обертів  $n_p$  корегуємо за паспортними даними верстата. Із ряду обертів шпинделя верстату вибираємо ближче менше значення  $n_g = 160 \text{ об/хв}$ .

За прийнятим значенням  $n_g$  визначаємо фактичну швидкість різання:

$$V_D = \frac{\pi \cdot D \cdot n_B}{1000} = \frac{3,14 \cdot 150 \cdot 160}{1000} = 75,36 \text{ м/хв}$$

Визначаємо розрахункову довжину обробки:

$$L_p = L_0 + L_1 + L_2 + L_3;$$

де:  $L_D = \frac{D_{\text{заг}} - D_{\text{отв}}}{2} = \frac{150 - 56}{2} = 47 \text{ мм}$  – довжина оброблюваної поверхні;

$L_1 = 2 \text{ мм}$  – величина підводу різця;

$L_2 = t \cdot \text{ctg}\varphi = 1,5 \cdot \text{ctg}45^\circ = 1,5 \text{ мм}$  – врізання різця в заготовку, мм;

$L_3 = 0,5 \text{ мм}$  – величина перебігу різця.

$$L_p = 47 + 2 + 1,5 + 0,5 = 51 \text{ мм}$$

Основний час на виконання переходу:  $t_{01} = \frac{L}{n_B \cdot S} = \frac{51}{160 \cdot 0,5} = 0,63 \text{ хв}$

Допоміжний час на виконання переходу:

$$t_{\text{доп1}} = t_{\text{вст}} + t_{\text{пер}} + t_{\text{зм}} + t_{\text{к}} = 0,16 + 0,1 + 0,06 + 0,24 = 0,56 \text{ хв}$$

де:  $t_{\text{вст}} = 0,16 \text{ хв}$  – допоміжний час, пов'язаний з встановленням деталі в патрон;

$t_{\text{пер}} = 0,1 \text{ хв}$  – час, пов'язаний з переходом і встановленням різця по лімбу;

$t_{\text{зм}} = 0,06 \text{ хв}$  – допоміжний час на заміну частоти обертів шпинделя і подачі;

$t_{\text{к}} = 0,24 \text{ хв}$  – допоміжний час на контрольні вимірювання.

**Перехід 30.2.** Точити пов.2  $\varnothing 140 \text{ мм}$   $L = 10 \text{ мм}$ .

Загальна глибина різання при обробці заданої поверхні:

$$t = \frac{150 - 140}{2} = 5 \text{ мм}$$

Подача залишається незмінною  $S_g = 0,5 \text{ мм/об}$ .

Визначаємо розрахункову швидкість різання:

$$V = \frac{C_V}{T^m \cdot t^x \cdot S^y} = \frac{150}{120^{0,2} \cdot 5^{0,15} \cdot 0,5^{0,35}} = 57,64 \text{ м/хв}$$

Визначаємо розрахункову частоту обертання шпинделя верстата:

$$n_p = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D_3} = \frac{1000 \cdot 57,65}{3,14 \cdot 150} = 122,38 \text{ об/хв}$$

Із ряду обертів шпинделя верстату 16К20 вибираємо найближче менше значення  $n_e = 100$  об/хв. За прийнятим значенням  $n_e$  визначаємо фактичну швидкість різання:

$$V_D = \frac{\pi \cdot D_3 \cdot n_B}{1000} = \frac{3,14 \cdot 150 \cdot 100}{1000} = 47,1 \text{ м/хв}$$

Визначаємо розрахункову довжину обробки:

$$L_p = L_0 + L_1 + L_2 + L_3;$$

де:  $L_0 = 10$  мм – довжина оброблюваної поверхні;

$L_1 = 2$  мм – величина підводу різця;

$L_2 = 5$  мм – величина врізання;

$L_3 = 0,5$  мм – величина перебігу різця.

$$L_p = 10 + 2 + 5 + 0,5 = 17,5 \text{ мм}$$

Основний час на виконання переходу  $t_{02} = \frac{L}{n_B \cdot S} = \frac{17,5}{100 \cdot 0,5} = 0,35$  хв

Допоміжний час на виконання переходу:

$$t_{\text{доп2}} = t_{\text{вст}} + t_{\text{пер}} + t_{\text{зм}} + t_{\text{к}} = 0 + 0,1 + 0,03 + 0,24 = 0,37 \text{ хв}$$

де:  $t_{\text{вст}} = 0$  хв – деталь уже встановлена і затиснута;

$t_{\text{пер}} = 0,1$  хв – час, пов'язаний з переходом і встановленням різця по лімбу;

$t_{\text{зм}} = 0,03$  хв – допоміжний час на заміну частоти обертів шпинделя;

$t_{\text{к}} = 0,24$  хв – допоміжний час на контрольні вимірювання.

#### **40. Свердлильна**

**Перехід 40.1** Свердлити отвір  $\varnothing 11$  довжиною  $l = 10$  мм пов.1.

Визначаємо швидкість різання:

$$V_p = \frac{53 \cdot d^{1,2}}{T^{0,9} \cdot S^{0,5}} = \frac{53 \cdot 11^{1,2}}{150^{0,9} \cdot 0,2^{0,7}} = 31,97 \text{ м/хв}$$

де:  $T = 150$  хв – середня стійкість свердла;

$S = 0,2$  мм/об – подача свердла;

$d = 11$  мм – діаметр отвору.

Визначаємо частоту обертання шпинделя свердлильного верстата:

$$n_p = \frac{1000 \cdot V_p}{\pi \cdot d} = \frac{1000 \cdot 31,97}{3,14 \cdot 11} = 925,59 \text{ об/хв}$$

Із ряду обертів шпинделя свердлильного верстата 2A125 вибираємо найближче менше значення:  $n_e = 765$  об/хв. За прийнятим значенням  $n_e$  визначаємо фактичну швидкість різання:

$$V_d = \frac{\pi \cdot d \cdot n_B}{1000} = \frac{3,14 \cdot 11 \cdot 765}{1000} = 26,42 \text{ м/хв}$$

Основний час на виконання переходу (для свердління одного отвору):

$$t_{01} = \frac{L}{S_B \cdot n_B} = \frac{16,5}{0,2 \cdot 765} = 0,1 \text{ хв}$$

де:  $L$  – розрахункова довжина оброблення для переходу:

$$L = l + l_1 + l_2 + l_3 = 10 + 2 + 4,5 = 16,5 \text{ мм},$$

де:  $l = 10$  мм – глибина різання;

$l_1 = 2$  мм – величина підведення свердла;

$l_2 + l_3 = 4,5$  мм – добавка на врізання і перебіг свердла.

Допоміжний час на виконання переходу:

$$t_{\text{доп}01} = t_{\text{вст}} + t_{\text{пер}} + t_{\text{зм}} + t_{\text{к}} = 0,3 + 0,2 + 0,12 + 0,24 = 0,86 \text{ хв}$$

де:  $t_{\text{вст}} = 0,3$  хв – час на встановлення деталі;

$t_{\text{пер}} = 0,2$  хв – допоміжний час для виконання змащення інструменту;

$t_{\text{зм}} = 0,05 + 0,08 = 0,12$  хв – допоміжний час на встановлення частоти обертів шпинделя і подачі;

$t_{\text{к}} = 0,24$  хв – допоміжний час на контрольні вимірювання.

## 8. ВИМОГИ ЩОДО МОНТАЖУ І ТЕХНІЧНОГО СЕРВІСУ

Ефективна та безпечна експлуатація шахтної зерносушарки безпосередньо залежить від якості її монтажу та своєчасного і кваліфікованого технічного сервісу. Недотримання встановлених вимог на будь-якому з цих етапів може призвести до зниження продуктивності, збільшення енергоспоживання, виходу обладнання з ладу, а в окремих випадках – до створення небезпечних ситуацій для персоналу та навколишнього середовища. Тому, дотримання вимог щодо монтажу та технічного сервісу є ключовим аспектом забезпечення надійної та довговічної роботи шахтної зерносушарки.

### *Вимоги до монтажу шахтної зерносушарки*

Процес монтажу шахтної зерносушарки є відповідальним етапом, що вимагає залучення кваліфікованого персоналу та суворого дотримання інструкцій виробника, проектної документації та чинних будівельних норм і правил. Основні вимоги до монтажу включають:

#### 1. Підготовка монтажного майданчика:

- вибір місця розташування - місце для встановлення шахтної зерносушарки повинно відповідати затвердженому генеральному плану території та забезпечувати зручний доступ для транспортування обладнання, завантаження та вивантаження зерна, а також проведення технічного обслуговування та ремонтних робіт. Слід враховувати напрямок вітру (для мінімізації розповсюдження пилу) та можливість підключення до інженерних мереж;
- несуча здатність ґрунту - ґрунт на майданчику повинен мати достатню несучу здатність для витримування статичного та динамічного навантаження від встановленої сушарки з максимально завантаженим зерном, а також вітрових навантажень. За необхідності проводяться інженерно-геологічні вишукування для визначення характеристик ґрунту та розрахунку фундаменту;

- рівність майданчика та дренаж - майданчик повинен бути ретельно вирівняний для забезпечення правильного встановлення всіх елементів сушарки без перекосів. Необхідно передбачити систему поверхневого водовідведення (дренажні канали, ухили) для запобігання накопиченню атмосферних опадів біля основи сушарки, що може призвести до корозії металевих конструкцій та пошкодження фундаменту;

- протипожежні вимоги - при виборі місця розташування необхідно дотримуватися протипожежних відстаней до інших будівель та споруд, особливо до зерносховищ та складів паливно-мастильних матеріалів. Слід передбачити можливість під'їзду пожежної техніки.

## 2. Влаштування фундаменту:

- при влаштуванні фундаменту необхідно суворо дотримуватися розмірів, глибини закладання, армування та якості бетонної суміші, передбачених проектом;

- до початку монтажу металевих конструкцій сушарки необхідно забезпечити повне затвердіння бетону фундаменту та перевірити його геометричні параметри на відповідність проектним значенням. Заставні деталі для кріплення опорних елементів сушарки повинні бути встановлені з високою точністю.

## 3. Збирання та встановлення обладнання:

- монтаж основних елементів шахтної зерносушарки (шахти, каркасу, бункерів, теплогенератора, вентиляторів, повітропроводів, завантажувально-розвантажувальних механізмів) повинен здійснюватися кваліфікованими монтажниками відповідно до інструкції виробника та монтажних схем;

- необхідно контролювати якість зварних та болтових з'єднань, забезпечуючи їхню міцність та надійність;

- при встановленні повітропроводів особливу увагу слід приділяти герметичності з'єднань для мінімізації втрат теплого повітря та забезпечення

ефективної роботи вентиляційної системи. Використання ущільнювальних матеріалів повинно відповідати температурному режиму роботи;

- рухомі елементи (вентилятори, приводи, транспортери) повинні бути встановлені таким чином, щоб забезпечити їхнє вільне обертання без заклинювань та вібрацій;

- завантажувально-розвантажувальні механізми (норії, шнеки, транспортери) повинні бути встановлені з дотриманням необхідних кутів нахилу та забезпечувати безперебійну подачу та відведення зерна.

#### 4. Електромонтажні роботи:

- електромонтажні роботи повинні виконуватися з дотриманням чинних Правил улаштування електроустановок та інших електротехнічних норм і правил;

- прокладання кабелів та проводів повинно здійснюватися відповідно до проектної документації з використанням захисних елементів;

- підключення електродвигунів, систем автоматики та контролю, освітлення повинно бути виконано згідно з електричними схемами та специфікаціями обладнання;

- обов'язковим є влаштування надійного контуру заземлення для всіх металевих частин сушарки та електрообладнання з метою забезпечення електробезпеки;

- необхідно встановити захисні автоматичні вимикачі та пристрої захисного відключення відповідно до потужності споживачів.

#### 5. Підключення до системи паливостачання:

- підключення шахтних зерносушарок повинно здійснюватися спеціалізованими організаціями, які мають відповідні ліцензії та дозволи;

- монтаж газопроводів, паливних насосів, фільтрів та іншого обладнання системи паливостачання повинен відповідати чинним нормам і правилам безпеки в газовому господарстві або при експлуатації установок, що працюють на рідкому паливі;

- необхідно забезпечити герметичність усіх з'єднань трубопроводів та обладнання для запобігання витокам палива. Після завершення монтажу проводяться випробування на герметичність.

#### 6. Пусконаладжувальні роботи:

- після завершення монтажу всіх елементів шахтної зерносушарки проводяться пусконаладжувальні роботи під керівництвом представників виробника або кваліфікованих спеціалістів;

- на цьому етапі здійснюється перевірка правильності монтажу, підключення до інженерних мереж, працездатності всіх механізмів та систем у різних режимах роботи (холостий хід, робочий режим);

- проводиться налаштування параметрів сушіння (температура теплоносія, витрата повітря, швидкість руху зерна) відповідно до типу та початкової вологості зерна;

- перевіряється робота систем автоматики та контролю, блокувань безпеки та сигналізації;

- після успішного завершення пусконаладжувальних робіт складається відповідний акт, і обладнання передається в експлуатацію.

#### *Вимоги до технічного сервісу шахтної зерносушарки*

Для забезпечення надійної та безперебійної роботи шахтної зерносушарки протягом усього терміну її експлуатації необхідно організувати належний технічний сервіс, який включає регулярне технічне обслуговування та своєчасне проведення ремонтних робіт.

Регулярність та обсяг робіт з технічного обслуговування визначаються інструкцією з експлуатації виробника та залежать від інтенсивності використання сушарки, типу зерна, що сушиться, та умов експлуатації. Як правило, передбачаються щозмінне, щоденне, щотижневе, щомісячне та щорічне технічне обслуговування.

Щозмінне обслуговування включає візуальний огляд обладнання перед початком та після закінчення зміни, контроль основних параметрів роботи

(температура, тиск, рівень палива), перевірку наявності сторонніх шумів та вібрацій. Щоденне обслуговування додатково до щозмінного включає очищення доступних елементів від пилу та залишків зерна, перевірку надійності кріплень, контроль рівня мастильних матеріалів. Щотижневе обслуговування передбачає більш ретельне очищення шахти, повітропроводів, вентиляторів, перевірку стану приводних ременів та ланцюгів, контроль роботи завантажувально-розвантажувальних механізмів. Щомісячне обслуговування включає перевірку стану підшипників, змащення вузлів, контроль герметичності паливопроводів, перевірку роботи систем автоматики та контролю, стан електропроводки та контактних з'єднань. Щорічне (сезонне) обслуговування проводиться перед початком або після закінчення сезону сушіння. Включає комплексну перевірку всіх систем та агрегатів, очищення важкодоступних місць, перевірку стану металевих конструкцій на наявність корозії, заміну зношених деталей, регулювання та налаштування обладнання.

Ремонт шахтних зерносушарок може бути поточним (заміна окремих швидкозношуваних деталей, усунення незначних несправностей) або капітальним (повне відновлення працездатності основних агрегатів та вузлів). Ремонтні роботи повинні виконуватися кваліфікованим персоналом з використанням оригінальних запасних частин або їхніх якісних аналогів, рекомендованих виробником. Після завершення ремонтних робіт обов'язково проводиться перевірка працездатності відремонтованого обладнання та його регулювання.

При проведенні будь-яких робіт з технічного обслуговування та ремонту необхідно суворо дотримуватися правил техніки безпеки та охорони праці, передбачених відповідними нормативними документами та інструкціями.

## 9. ОПИС СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

Система управління роботою шахтної зерносушарки є комплексом технічних і програмних засобів, призначених для автоматизації та оптимізації процесу сушіння зерна. Її основна мета полягає у забезпеченні ефективного, рівномірного та енергоощадного висушування зерна до необхідної вологості.

Основні функціональні підсистеми:

### 1. Підсистема контролю параметрів процесу:

- вимірювання вологості зерна - безперервний контроль вологості зерна на вході та виході сушарки за допомогою датчиків вологості;
- вимірювання температури повітря - моніторинг температури гарячого та холодного повітря в різних зонах сушарки за допомогою термодатчиків;
- вимірювання швидкості повітря - контроль швидкості повітряного потоку, що проходить через шар зерна, за допомогою анемометрів або інших датчиків витрати повітря;
- вимірювання рівня зерна - контроль рівня зерна в бункерах завантаження та вивантаження, а також у самій шахті сушарки за допомогою датчиків рівня;
- контроль тиску - вимірювання тиску повітря в різних зонах сушарки для забезпечення оптимального розподілу повітряного потоку.

### 2. Підсистема регулювання:

- регулювання температури теплоносія - автоматичне керування потужністю нагрівальних елементів (пальників, теплогенераторів) для підтримки заданої температури сушильного агента;
- регулювання витрати повітря - керування роботою вентиляторів для забезпечення необхідної швидкості повітряного потоку;
- регулювання швидкості вивантаження зерна - зміна швидкості роботи вивантажувальних механізмів (шнеків, транспортерів) для контролю часу перебування зерна в сушарці та досягнення необхідної кінцевої вологості;

- керування розподільними пристроями - управління заслінками, клапанами та іншими механізмами для оптимізації розподілу повітряного потоку в шахті сушарки.

### 3. Підсистема управління та візуалізації:

- промисловий контролер (PLC) - центральний керуючий елемент, який приймає сигнали від датчиків, обробляє їх за заданими алгоритмами та видає керуючі сигнали на виконавчі механізми;

- панель оператора (HMI) або SCADA-система - інтерфейс для оператора, що відображає поточні значення технологічних параметрів, графіки їх зміни, стан виконавчих механізмів, повідомлення про аварії та попередження. Дозволяє оператору задавати режими роботи, змінювати параметри сушіння та контролювати процес;

- система збору та зберігання даних - реєстрація історії даних про параметри процесу, що дозволяє проводити аналіз роботи сушарки, виявляти тенденції та оптимізувати режими сушіння;

- система діагностики та оповіщення - автоматичне виявлення відхилень від заданих параметрів, несправностей обладнання та формування аварійних сигналів для оператора.

### 4. Підсистема безпеки:

- системи контролю полум'я - забезпечення безпечної роботи пальників;

- датчики перегріву - запобігання надмірному нагріванню зерна та обладнання;

- системи блокування та захисту - запобігання несанкціонованому доступу та неправильним діям оператора;

- аварійна зупинка - можливість швидкої зупинки всього обладнання у випадку нештатної ситуації.

Принципи роботи системи управління. Система управління працює за принципом зворотного зв'язку. Датчики безперервно вимірюють ключові параметри процесу сушіння. Отримані дані передаються на контролер, який

порівнює їх із заданими значеннями. У разі відхилення контролер генерує керуючі сигнали для виконавчих механізмів, щоб повернути параметри до заданих меж.

Переваги використання автоматизованої системи управління:

- підвищення якості сушіння за рахунок стабілізації та оптимізації технологічного процесу;
- зниження енергоспоживання завдяки точному регулюванню параметрів;
- збільшення продуктивності сушарки за рахунок скорочення часу сушіння та мінімізації простоїв;
- зменшення втрат зерна;
- покращення умов праці операторів за рахунок автоматизації рутинних операцій та забезпечення інформацією про процес;
- можливість ведення обліку та аналізу роботи сушарки.

## 10. ЗАХОДИ ЩОДО ОХОРОНИ ПРАЦІ

### *Загальні положення з охорони праці*

Охорона праці - це система організаційних, технічних, санітарно-гігієнічних, соціально-економічних і правових заходів, спрямованих на забезпечення безпечних та здорових умов праці, попередження нещасних випадків і професійних захворювань.

У відповідності до Закону України «Про охорону праці», роботодавець зобов'язаний створити на кожному робочому місці умови праці, що відповідають вимогам нормативно-правових актів з охорони праці, забезпечити навчання, інструктаж і медичне обслуговування працівників.

Особливої уваги вимагає забезпечення безпеки при роботі зі складним технічним обладнанням, таким як зерносушарки, які є джерелом підвищеної небезпеки через вплив високих температур, рухомих механізмів, електроструму та можливих вибухонебезпечних ситуацій при сушінні зерна з підвищеною вологістю.

### *Охорона праці при експлуатації шахтної зерносушарки*

Шахтна зерносушарка – це агрегат, що працює в умовах підвищеної температури, вологості, пилу та шуму. Тому її експлуатація вимагає суворого дотримання заходів безпеки.

Вимоги до персоналу:

- до обслуговування зерносушарки допускаються лише особи, які пройшли навчання, інструктаж з охорони праці та техніки безпеки, а також медичний огляд;
- працівники повинні мати допуск до роботи з електроустановками відповідної категорії;
- обслуговуючий персонал повинен користуватися засобами індивідуального захисту (ЗІЗ) - спецодяг, рукавиці, респіратори, навушники або беруші.

#### Вимоги до обладнання:

- сушарка повинна бути оснащена захисними огороженнями всіх рухомих і обертових механізмів;
- усі електроприлади повинні мати заземлення та захисне відключення у разі перевантаження або короткого замикання;
- установлені прилади контролю температури та вологості повинні регулярно перевірятися на справність та точність показників;
- газові або твердопаливні пальники обладнуються автоматикою безпеки з функцією аварійного відключення.

#### Правила безпечної експлуатації:

- забороняється перебування працівників у робочій зоні під час запуску або зупинки сушарки;
- усі ремонтні роботи виконуються тільки після повного знеструмлення обладнання та підтвердження відсутності залишкового тиску і температури;
- не дозволяється завантаження в сушарку зерна з підвищеним вмістом сторонніх домішок, які можуть стати джерелом займання.

#### Пожежна безпека:

- зерносушарка повинна мати не менше двох порошкових вогнегасників на кожному рівні обслуговування;
- всі працівники зобов'язані знати місцезнаходження засобів пожежогасіння та проходити навчання з пожежної безпеки;
- регулярно проводяться навчальні тривоги та огляди протипожежного інвентарю.

#### Медичне та санітарне забезпечення:

- на території зерносушильного комплексу має бути аптечка першої допомоги, доступна для персоналу;
- працівники мають проходити періодичні медичні огляди згідно з графіком;

- робочі місця повинні бути забезпечені питною водою, умовами для відпочинку та гігієни.

Організаційні заходи:

- на кожному підприємстві розробляється інструкція з охорони праці для конкретних робіт і обладнання;
- ведеться журнал інструктажів, до якого вносяться всі проходження навчань та перевірки знань;
- призначаються відповідальні особи за безпеку експлуатації зерносушильного обладнання.
- створюється комісія з охорони праці, яка періодично перевіряє стан робочих місць.

## ВИСНОВКИ

Проведений аналіз технологічного процесу сушіння зерна дозволив виявити потенціал для покращення однорідності вологості зерна на виході із зерносушарки ДСП-32-ОТ. Нарямком досягнення цієї мети є організація додаткового циклу проходження зерна через сушильну шахту.

Запропоноване технічне рішення базується на додатковому контурі рециркуляції. Цей контур передбачає часткове повернення зерна, яке вже пройшло первинний цикл сушіння, для його повторного контакту з сушильним агентом. Така рециркуляція дозволяє не лише вирівняти вологість окремих партій зерна, які могли бути недостатньо просушені під час першого проходу, але й оптимізувати загальну якість сушіння.

Впровадження даного технічного рішення дозволить не тільки підвищити ефективність сушіння, але й зменшити ймовірність утворення осередків підвищеної вологості, що може призвести до псування зерна під час зберігання. Це, в свою чергу, матиме позитивний економічний ефект за рахунок збереження якості продукції та зменшення втрат.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Подпратов Г. І., Рожко В. І., Скалецька Л. Ф. Технологія зберігання та переробки продукції рослинництва : підручник. Київ : Аграрна освіта, 2014. 393 с.
2. Подпратов Г. І., Бобер А. В. Післязбиральна доробка та зберігання продукції рослинництва : навчальний посібник. Київ : НУБіП, 2024. 650 с.
3. Подпратов Г. І., Бобер А. В., Гунько С.М. Переробка продукції рослинництва : навчальний посібник. Київ : НУБіП, 2023. 580 с.
4. Технологія зберігання і переробки продукції рослинництва : підручник / Г. І. Подпратов та ін. ; Київ : НУБіП, 2023. 844 с.
5. Осокіна Н. М. Якість та облік зерна за приймання, оброблення і зберігання зерна : навчальний посібник. Умань. 2021. 455 с.
6. Мельник О. В., Коваленко П. І. Технологія зберігання і переробки продукції рослинництва : підручник. Київ : Вища освіта, 2006. 463 с.
7. Замай Ж. В., Волкова Р. М., Іваненко К. М. Технологія зберігання і переробки зерна : методичні вказівки до виконання лабораторних робіт. Чернігів : Чернігівська політехніка, 2021. 36 с.
8. Fellows P. J. Food Processing Technology: Principles and Practice : book. Woodhead Publishing, 2009. 912 p.
9. Іваненко Ф. В., Сінченко В. М. Технологія зберігання та переробки сільськогосподарської продукції : навч.-метод. посіб. Київ : КНЕУ, 2005. 221 с.
10. Машини і обладнання для зберігання та комплексної обробки зерна : навч. пос. / А. С. Кобець та ін. ; ДДАУ, Дніпропетровськ, 2013. 766 с.
11. Саблін О. І., Буряк В. В., Ткаченко О. М. Технологія та обладнання для зберігання і переробки зерна : підручник. Харків : ХНАДУ, 2012. 324 с.
12. Демчук М. В., Погорілий В. В. Енергозбереження в процесах післязбиральної обробки зерна : підручник. Вінниця : ВНАУ, 2010. 180 с.

13. Пилат В. П., Лопушняк В. І., Пастух В. П. Технологія зберігання і переробки зерна та олійних культур. Львів : Новий Світ, 2011. 432 с.

14. Малин Н. І. Енергозберігаюча сушка зерна : підручник. Київ : КолосС, 2004. 240 с.

15. Шаповаленко О. І. Сушіння зерна : конспект лекцій. Київ : НУХТ, 2007. 100 с.

16. Черниш П. Г. Технологічне обладнання зернопереробних підприємств : конспект лекцій. Київ : НУХТ, 2007. 86 с.

17. Активне вентилявання та сушіння зерна: навч. посіб. / О. І. Гапонюк та ін. Одеса : ВМВ, 2014. 326 с.

18. Гібридна зеросушарка : пат. 121207 Україна. № 201609126 ; заявл. 06.02.2015, Бюл. № 8. 13 с.

19. Шахтна зерносушарка : пат. 64900 Україна. № 201104245 ; заявл. 07.04.2011, Бюл. № 22. 5 с.