

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра тракторів і сільськогосподарських машин

П о я с н ю в а л ь н а з а п и с к а

до дипломної роботи
освітнього ступеня "Магістр"

на тему:

**«Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів установки
для активного вентилявання та очищення зерна від легких домішок»**

Виконав: студент 2 курсу, групи МГАІ-4-24
за спеціальністю 208 "Агроінженерія"

_____ Шаповал Анатолій Олегович

Керівник: _____ Золотовська Олена Володимирівна

Рецензент: _____

Дніпро 2025

**ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерно-технологічний факультет

Кафедра: тракторів і сільськогосподарських машин

Освітній ступінь: "Магістр"

208 "Агроінженерія"

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

ТСГМ

(назва кафедри)

ДОЦЕНТ

(вчене звання)

Теслюк Г.В.

(підпис)

(прізвище, ініціали)

„_____” _____ 20__ р.

**З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Шаповал Анатолій Олегович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів установки для активного вентилявання та очищення зерна від легких домішок керівник роботи к.т.н., доцент Золотовська Олена Володимирівна

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від

“24” жовтня 2025 року №3182

2. Строк подання студентом роботи 29.11.2025 р

3. Вихідні дані до роботи 1. Сучасний стан техніки та технологій очистки зерна, аналіз джерел та обґрунтування дослідження з обраної тематики.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Сучасний стан техніки та технологій очистки зерна. 2. Теоретичне обґрунтування дипломної роботи. 3. Обґрунтування методики проведення та результатів експериментальних досліджень 4. Охорона праці та захист навколишнього середовища. 5. Техніко-економічна оцінка ефективності розробленого комбінованого агрегату. Висновок. Список літератури.

5 Перелік демонстраційного матеріалу

1. Мета і предмет досліджень. (2 аркуш, А4).

2. Огляд і аналіз конструкцій (1 аркуш, А4). 3. Теоретичні дослідження (2 аркуші, А4). 4. Експериментальні дослідження (2 аркуші А4)

5. Економічна частина. (1 аркуш 4А)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1.	Золотовська О.В., доцент		
2	Золотовська О.В., доцент		
3	Золотовська О.В., доцент		
4	Золотовська О.В., доцент		
5	Золотовська О.В., доцент		
Нормо-контроль	Теслюк Г.В., завідувач кафедри		

7. Дата видачі завдання 30.03.2025

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз технічних рішень	до 27.05.25 р	
2.	Виконання теоретичних досліджень	до 30. 06.25 р	
3	Виконання експериментальних досліджень	до 8.09.25 р.	
4	Охорона праці	до 06.11.25 р.	
5	Економічна частина	до 20.11.25 р.	
6.	Демонстраційний матеріал	до 23.11.25 р.	

Студент

_____ (підпис)

Шаповал А.О.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Золотовська О.В.
(прізвище та ініціали)

Анотація

Шаповал А.О. Обґрунтування конструктивно-режимних параметрів установки для активного вентилявання та очищення зерна від легких домішок/ Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 208 «Агроінженерія» – ДДАЕУ, Дніпро, 2025.

Дипломна робота присвячена дослідженню та оптимізації процесів очищення зерна від легких домішок та активного вентилявання зернової маси в насипі. У роботі проведено аналіз існуючих способів очищення та вентилявання зерна, визначено їхні переваги та недоліки, а також розроблено конструкцію установки з перфорованою центральною трубою та спіралеподібним відведенням відпрацьованого повітря, що забезпечує рівномірний розподіл повітряного потоку та виключає потребу у внутрішніх перемішувальних механізмах.

Експериментальні дослідження дозволили встановити оптимальні параметри процесу: висота шару зерна 1 м, швидкість повітря 1,2 м/с та температура 80 °С, що забезпечує мінімальні енергозатрати та високий коефіцієнт очищення. Розроблені регресійні рівняння та графіки залежності питомих енергозатрат та кінцевої вологості зерна від параметрів процесу дозволяють прогнозувати результати обробки зернової маси.

Впровадження системи активного вентилявання та очищення зерна дозволяє зменшити втрати зерна з 5% до 2%, покращити якість продукції, рівномірність вологості та ринкову цінність зерна. Економічна доцільність проекту підтверджується розрахунком ефекту – економія становить 4 800 000 грн/рік, а термін окупності складає близько 20 днів.

Робота містить науково-технічне обґрунтування обраної технології, методику експериментальних досліджень, розробку установки та рекомендації щодо впровадження на підприємствах зернопереробної та аграрної галузей.

Ключові слова: очищення зерна, активне вентилявання, пневмокамера, регресійне моделювання, питомі енергозатрати, кінцева вологість, оптимальні параметри, економічна ефективність.

ЗМІСТ

Вступ	7
1 СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНІКИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ОЧИСТКИ ЗЕРНА	10
1.1 Аналіз способів очистки зерна	10
1.2 Аналіз методів активного вентиляювання та сушіння зерна	16
2 ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ПРОЦЕСІВ ОЧИСТКИ ЗЕРНА ВІД ЛЕГКИХ ДОМІШОК У ПОТОЦІ ТА СУШІННЯ ЗЕРНА СПОСОБОМ АКТИВНОГО ВЕНТИЛЮВАННЯ	34
2.1 Вибір ефективного способу поточної очистки зерна від легких домішок та раціональної конструкції пристрою (пневмокамери)	34
2.1.1 Моделювання процесу очищення зерна від легких домішок у висхідному повітряному потоці	36
2.2 Вибір способу активного вентиляювання та конструкції установки для сушіння зерна	40
2.2.1 Моделювання процесу сушіння зерна способом активного вентилювання	43
3 ОБГРУНТУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ПРОЦЕСІВ ОЧИСТКИ ЗЕРНА ВІД ЛЕГКИХ ДОМІШОК У ПОТОЦІ ТА СУШІННЯ ЗЕРНА СПОСОБОМ АКТИВНОГО ВЕНТИЛЮВАННЯ	48
3.1 Методика проведення експериментального дослідження процесу поточної очистки зерна від легких домішок	48
3.2 Методика проведення експериментального дослідження процесу сушки активним вентиляюванням	54
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	63
4.1 Загальні вимоги при експлуатації обладнання для активного вентилювання та очищення зерна	63
4.2 Захист навколишнього середовища при експлуатації обладнання для активного вентиляювання та очищення зерна	65
5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ОЧИЩЕННЯ ТА АКТИВНОГО ВЕНТИЛЮВАННЯ ЗЕРНА	68
ВИСНОВКИ	71
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	72

ВСТУП

Сучасний розвиток агропромислового комплексу України потребує підвищення ефективності технологічних процесів збирання, доробки та зберігання зернових культур. Одним із найважливіших етапів технологічного циклу виробництва зерна є його післязбиральна обробка, від якості якої безпосередньо залежить збереження врожаю, показники якості та конкурентоспроможність продукції на ринку.

За результатами досліджень, витрати на післязбиральну обробку становлять близько 35–40% від загальних витрат на виробництво зерна. Водночас інтенсивність збиральних робіт, як правило, перевищує пропускну здатність обладнання для післязбиральної доробки. Це призводить до накопичення зерна на відкритих майданчиках, його нерівномірного прогрівання, самозігрівання та втрати якісних характеристик. Вологість і засміченість зібраного зерна залежно від погодних умов становить у середньому 14–24%.

Відомі технології та обладнання для очищення зерна від легких домішок і активного вентиляювання не забезпечують належної ефективності через низьку продуктивність, високу енергоємність і складність експлуатації. Особливо актуальною залишається проблема відсутності сучасних технічних засобів для потокової очистки зерна на приймальних і перевантажувальних пунктах, а також обладнання для активного вентиляювання зернової маси в ємностях зерносховищ.

Пошукові дослідження свідчать, що у більшості існуючих систем активного вентиляювання спостерігається нерівномірний розподіл температури по висоті шару зерна. Це зумовлює утворення зон підвищеної вологості, де розвиваються мікроорганізми, що призводить до псування продукції. Отже, вдосконалення технологій післязбиральної обробки зерна та створення ефективного енергозберігаючого обладнання є важливим науково-практичним завданням.

Актуальність теми полягає у необхідності розроблення ресурсозберігаючого та високоефективного технологічного обладнання для потокового очищення зерна від легких домішок і активного вентилявання зернової маси у процесі сушіння. Реалізація таких рішень дозволить зменшити енерговитрати, підвищити якість зерна та забезпечити стабільні умови його зберігання.

Об'єкт дослідження – процес післязбиральної обробки зерна, що включає очищення від легких домішок і сушіння з використанням активного вентилявання.

Предмет дослідження – гідродинамічні закономірності зміни тиску та швидкості повітряного потоку під час очищення зерна від легких домішок, а також закономірності теплопередачі при активному вентиляванні зернової маси.

Мета роботи – створення ресурсозберігаючого та високоефективного технологічного обладнання для потокового очищення зерна від легких домішок у приймальних і перевантажувальних пунктах та його сушіння методом активного вентилявання у ємностях зерносклади.

Для досягнення поставленої мети передбачено виконання таких завдань:

1. Обґрунтувати необхідність удосконалення технологічних процесів очищення зерна від легких домішок і сушіння методом активного вентилявання.
2. Розробити науково-практичні підходи до підвищення ефективності процесів очищення та сушіння зерна з аналітичним описом закономірностей теплопередачі.
3. Визначити раціональні параметри потокового очищення зерна від легких домішок та активного вентилявання.
4. Провести експериментальні дослідження впливу швидкості повітряного потоку, товщини шару зерна та висоти пневмокамери на якість очищення.

5. Встановити залежності кінцевої вологості зерна та питомих енергозатрат процесу сушіння від температури, швидкості повітря й висоти шару зерна.

6. Провести виробничі випробування дослідних зразків обладнання та визначити оптимальні режими його роботи.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні конструкції установки для потокового очищення зерна від легких домішок та системи активного вентилявання, які забезпечують рівномірне сушіння, зменшення енерговитрат і підвищення технологічної ефективності процесів післязбиральної обробки.

1 СУЧАСНИЙ СТАН ТЕХНІКИ ТА ТЕХНОЛОГІЙ ОЧИСТКИ ЗЕРНА

1.1 Аналіз способів очистки зерна

Для очищення зерна від легких домішок і пилу переважно використовують машини пневматичної дії, в яких робочим середовищем виступає повітряний потік (Гутаревич, 2017; Mohsenin, 2019). Попереднє розшарування сипкої суміші дозволяє підвищити концентрацію легких домішок у верхньому шарі зернової маси та підвищити ефективність очищення. У математичних моделях цього процесу враховуються умови введення легких домішок, їхні розміри і щільність, а також технологічні й конструктивні параметри пневмосепаратора (Кисіль, 2018).

Використання багатоярусних сортувальних решіт і аспіраційних систем у зерноочисних машинах дозволяє підвищити ефективність видалення легких домішок. Рекомендоване збільшення частки сортувальних решіт до 70–80% і швидкості повітряного потоку в аспіраційних каналах до 8 м/с забезпечує кращу якість очищення (Zhang & Liu, 2020). Разом із тим, послідовне використання аспіраційних систем і сортувальних решіт ускладнює конструкцію обладнання та підвищує експлуатаційні витрати.

Багатовимірний аналіз процесу пневмосепарації соломистого вороху показав, що поділ подрібненого вороху на задані фракції можливий при продуктивності 0,6–0,7 кг/м·с, а вміст соломи у робочій фракції при раціональному режимі роботи пневмосепаратора становить 97,03% (Гутаревич, 2017). Збільшення кількості пневмоканалів у машині ускладнює конструкцію та підвищує експлуатаційні витрати.

Розрахунок технологічних параметрів універсальної зерноочисної машини показав, що очищення зерна від легких домішок до закладання його у зерносховище зменшує витрати на транспортування і підвищує ефективність роботи обладнання (Кисіль, 2018). Перспективним є використання псевдокиплячих шарів для поділу зернової маси на фракції за густиною. Механіко-математична модель процесу враховує пористість шару, амплітуду

й частоту коливань частинок, кути нахилу робочої поверхні та напрямок коливань, що дозволяє визначити раціональні параметри роботи пневматичного сортувального стола (Mohsenin, 2019; Zhang & Liu, 2020).

У аеродинамічних зерноочисних машинах ступінь зміни швидкості падіння зерна залежить від напрямку повітряного потоку. Якщо рух повітряного потоку перпендикулярний до напрямку руху зерна і має швидкість, нижчу за швидкість витання основної маси зерна, то швидкість руху зернових частинок практично не змінюється через відмінності аеродинамічних властивостей складових фракцій зерна.

Технологічна ефективність видалення легких домішок із вертикального потоку зерна визначається різницею аеродинамічних властивостей зернових фракцій (відмінністю у швидкості витання) та пористістю рухомого шару зерна. Чим більша площа вільного перерізу в зерновому шарі, тим вища ймовірність підвищення інтенсивності відділення легких домішок, оскільки зіткнення легких домішок із зерновими частинками основної маси у вільному просторі відбуваються рідше.

Відповідно, збільшення міжзернового простору в аеродинамічній камері або коефіцієнта «живого перерізу» у вертикальному перерізі камери можливе лише зі збільшенням ширини або товщини камери залежно від способу подачі зерна.

Українські дослідники (Петренко С.В., Ковальчук І.П., Шевченко О.М.) [39] розробили низку технологічних аераційних машин для очищення зерна на перевантажувальних пунктах, зокрема аерожолоби та обеспилювальні камери. Принцип роботи існуючих аераційних машин базується на створенні псевдозрідженого шару в робочій камері (аерожолоб, обеспилювальна камера), що забезпечує ефективне відділення легких домішок від основної маси зерна.

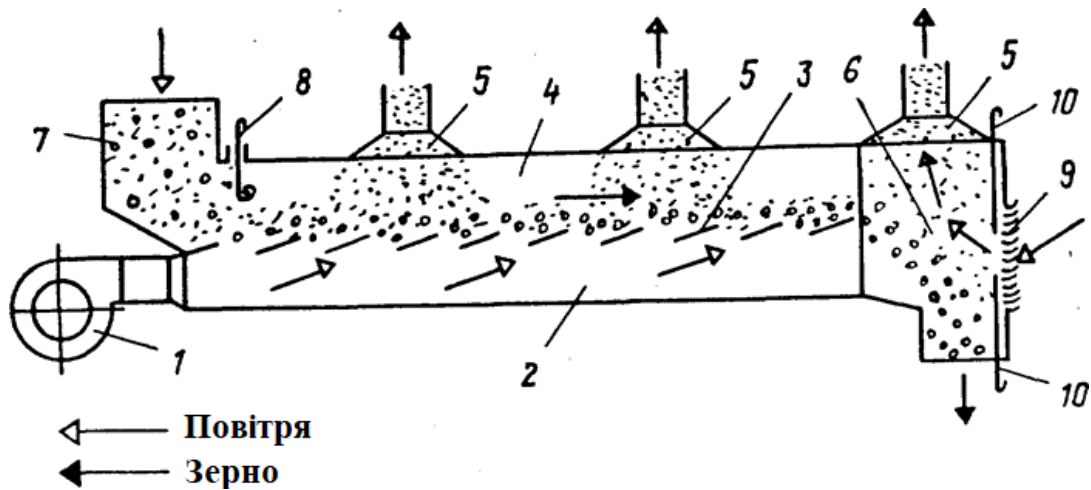


Рисунок 1.1 – Функціональна схема аерожелоба

Аерожолоб (рис. 1.1) складається з двох каналів: повітропідвідного (1) та транспортного (2). Після подачі повітряного потоку в повітропідвідний канал (1) зерно переміщується вздовж повітророзподільної решітки (3) під дією повітряного потоку, який надходить через отвори решітки. Під час безперервного руху зерна відбувається відділення легких домішок, швидкість витання яких менша за швидкість витання основної маси зерна; вони піднімаються у надзерновий простір і видаляються відпрацьованим повітряним потоком.

Для підвищення продуктивності очищення зерна від легких домішок була запропонована камера для видалення пилу (рис. 1.2). Кут нахилу повітророзподільної решітки збільшено до приблизно 30° з таким розрахунком, щоб шар зерна переміщувався під дією власної сили тяжіння поряд із впливом повітряного потоку. За прийнятої довжини камери (1,1 м) час впливу повітряного потоку на шар зерна обмежений, що негативно впливає на ефективність процесу.

Технологічна ефективність аераційних машин, розроблених під керівництвом українських дослідників (рисунок 1.2), не перевищує 60% через низький гідравлічний опір повітророзподільної жалюзної решітки при значній товщині оброблюваного шару зерна. Чим більше гідравлічний опір решітки, тим ефективніше відбувається рівномірний розподіл повітряного потоку у міжзерновому просторі шару зерна.

Як показали пошукові дослідження, для підвищення ефективності відділення легких домішок у потоці зерна за допомогою аераційних машин необхідно зменшити товщину шару зерна на поверхні повітророзподільної та несучої решітки. Для забезпечення необхідної продуктивності машини також доцільно збільшити кількість секцій у робочій камері.

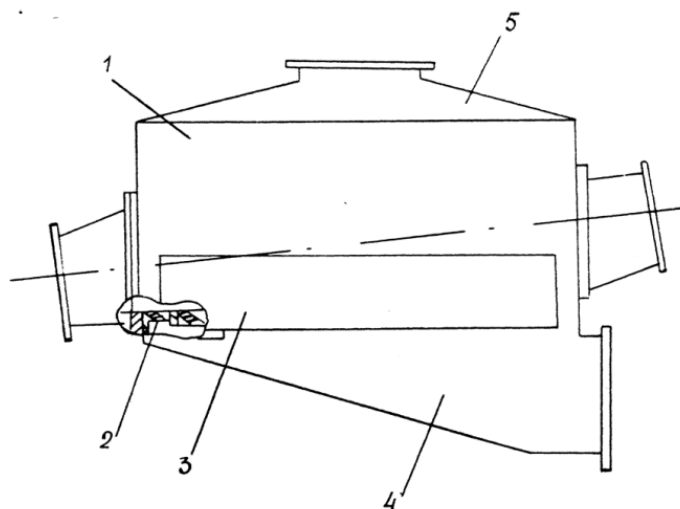


Рисунок 1.2 – Загальний вигляд камери для видалення пилу

1 – робоча камера; 2 – повітророзподільна решітка; 3 – оглядовий люк; 4 – повітропідвідний канал; 5 – канал для відведення повітряного потоку та легких домішок

Багатосекційний пристрій призначений для відділення крупних і легких домішок із сипкого продукту і складається з приймального та випускного патрубків, клиноподібних жалюзних патрубків у кожній секції для подачі та відведення повітря та робочої камери між ними. Жалюзі в патрубках розташовані з поступовим зменшенням товщини зазору між жалюзними пластинами у напрямку руху продукту в камері. Це забезпечує рівномірний розподіл повітря в міжзерновому просторі як по ширині, так і по висоті робочої камери.

Однак жалюзна решітка зі зменшеним кроком пластин не створює достатніх гідродинамічних опорів, які забезпечують технологічну ефективність процесу очищення зерна від легких домішок. Рух шару зерна по вертикальному напрямку набуває інтенсивного характеру. Створення

постійного вакууму всмоктуванням повітряного потоку по висоті робочої камери при послідовно зменшеному кроці отворів повітророзподільної решітки ускладнює експлуатацію технологічного обладнання.

А.Аскарвою проведено експерименти для визначення раціональних параметрів багатосекційного завантажувального пристрою для очищення зерна від легких домішок на перевантажувальних пунктах елеваторів. За результатами дослідження технологічна ефективність процесу підвищується до 80% за рахунок поділу шару зерна на кілька зернових прошарків [42].

Проте через недостатність гідравлічного опору повітророзподільної жалюзної решітки при її конструкції із значними (20 мм) кроками пластин по висоті камери повітря у міжзерновому просторі розподіляється нерівномірно.

Технологічна ефективність машин, що працюють за принципом створення псевдозрідженого шару зерна, залежить від таких факторів:

- а) гідравлічний опір повітророзподільної решітки – чим він більший, тим рівномірніше розподіляється повітряний потік у міжзерновому просторі;
- б) тривалість обробки зерна повітряним потоком – при короткочасному впливі технологічна ефективність знижується;
- в) товщина шару зерна – надмала товщина шару призводить до зупинки роботи машини, а велика товщина збільшує енергетичні витрати і може знизити ефективність процесу.

Крім того, в технологічному обладнанні, що працює за принципом псевдозрідження, одночасне регулювання параметрів робочого агента – повітряного потоку (частота обертання лопатевого колеса вентилятора або витрата повітря, надлишковий тиск у системі аспірації) та подачі зернової суміші – ускладнює створення псевдозрідженого або киплячого шару. Найменша зміна вихідних властивостей зерна або будь-яких параметрів процесу порушує принцип створення псевдозрідження.

При нерівномірній товщині та неоднорідному складі зернової суміші за вологістю та вмістом легких домішок гідравлічний опір шару зерна на решітці набуває нерівномірного характеру. Відповідно, повітряний потік швидше

проходить через ділянки решітки з меншим гідравлічним опором, утворюючи вільні повітряні канали.

Розглянемо схему сил, що діють на зернинку шару зерна, який переміщується по поверхні решітки під дією повітряного потоку (рис. 1.3)

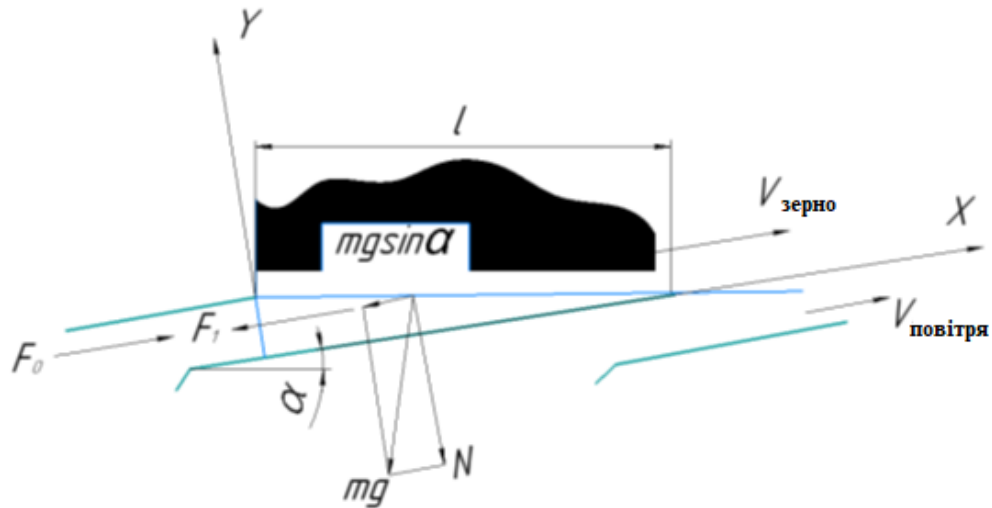


Рисунок 1.3 - Схема сил, що діють на матеріал під час його переміщення по аераційному транспортеру

Для подолання гідравлічного опору R решітки та шару зерна, що рухається без відриву, він повинен бути меншим за силу дії повітря F на зернинки у шарі.

За умови безперервного переміщення зерна по поверхні решітки без відриву необхідну силу дії повітря F для подолання опору шару зерна масою m автор пропонує визначати на основі закономірності руху твердих тіл по похилій поверхні:

$$F = mg \sin \alpha + f \cdot mg \cos \alpha$$

f - коефіцієнт тертя зернинки об поверхню решітки;

α – кут виходу повітря з отворів решітки;

m – маса переміщуваного шару зерна на розглянутому ділянці решітки довжиною L , кг;

g – прискорення вільного падіння, m/c^2 .

Відмінність обезпилувальної камери від аерожолоба полягає в тому, що кут нахилу жалюзної решітки дорівнює тангенсу коефіцієнта поверхневого тертя шару зерна. Завдяки цьому шар зерна може переміщуватися під дією власної сили тяжіння одночасно з дією повітряного потоку. Незалежно від товщини шару на поверхні повітророзподільної несучої решітки, енергоємність самого процесу псевдозрідження висока: вона залежить від маси зерна та сили взаємного зчеплення зерен.

В цілому, принцип роботи існуючих машин пневмо- та аераційної дії для очищення зерна від легких домішок базується на створенні псевдозрідженого шару зерна, що потребує великих витрат енергії через неминуче подолання сил взаємного зчеплення та ваги зерен.

1.2 Аналіз методів активного вентилявання та сушіння зерна

У промисловості використовують чотири основні способи конвективного сушіння зерна:

- високотемпературне сушіння;
- високотемпературне сушіння з застосуванням активного вентилявання (двоступенева сушка);
- поєднання високотемпературного та низькотемпературного сушіння;
- низькотемпературне сушіння способом активного вентилявання.

У багатьох випадках при активному вентиляванні зерна використовують атмосферне повітря залежно від стану зерна. При цьому атмосферне зовнішнє повітря інтенсивно продувається через нерухому насип зерна.

Основна суть активного вентилявання зерна полягає у:

- зниженні температури зернової насипу при самонагріванні;
- зменшенні вологості зерна;
- забезпеченні повітрообміну у міжзерновому просторі.

Активне вентилявання зерна застосовується для охолодження зернової маси, щоб уповільнити всі фізіологічні та мікробіологічні процеси, що

відбуваються в зернових насипах. Під час охолодження температури зернової маси знижують до 10 °С. Вентилювання для охолодження зерна переважно проводять уночі, використовуючи нічне зниження температури.

Неефективне активне вентиляювання зерна в ємності може призводити до таких негативних наслідків:

- підвищення вологості зерна через поглинання вологи з повітряного потоку;
- підвищення температури зерна через нагрівання повітряним потоком.

Відповідно до технологічного регламенту зберігання зерна, основні вимоги до технології активного вентиляювання зерна в ємкостях такі:

1. вологість зерна не повинна перевищувати рівноважне значення (11–12,5 % для південних регіонів, 12–14 % для північних регіонів країни);
2. температура зерна не повинна перевищувати температуру навколишнього середовища, тобто зернова маса не повинна нагріватися.

Підвищення технологічної ефективності процесу активного вентиляювання зерна залежить від обраного способу та установки для його здійснення. На рисунку 1.4 показано принципові схеми системи циркуляції повітря з зазначенням напрямку повітряного потоку в міжзерновому просторі при активному вентиляюванні зерна (сушінні).

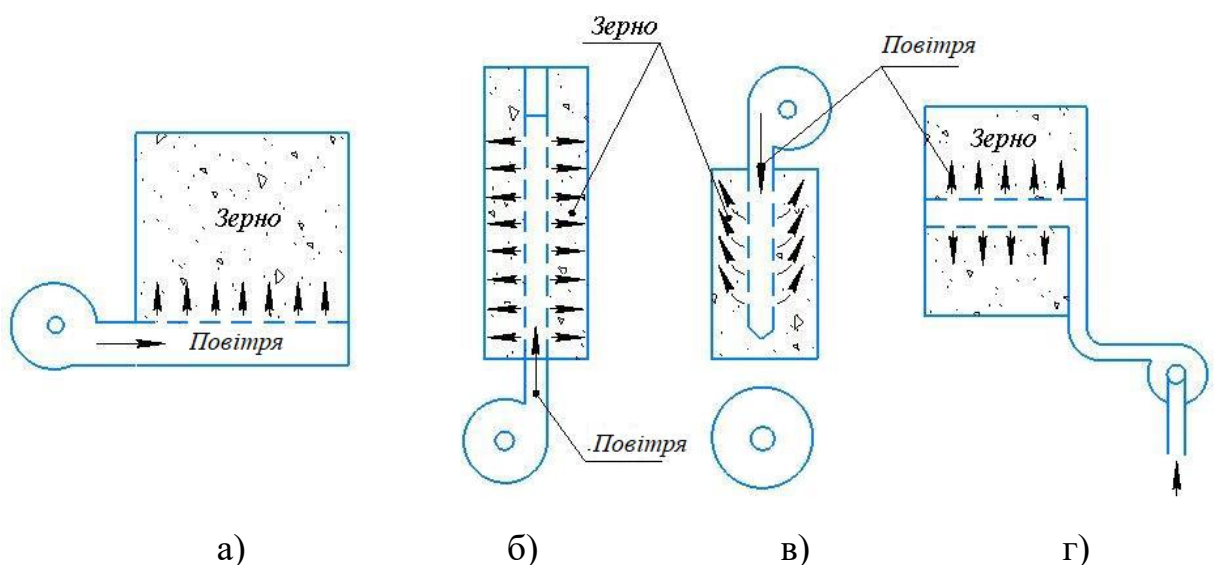


Рисунок 1.4 - Принципові схеми існуючих способів активного вентилявання зерна в ємності при русі повітряного потоку в міжзерновому просторі за напрямкам

У випадку вертикальної системи подачі повітря (рис. 1.4, а) повітряний потік, який продувається через горизонтальну пористу поверхню повітророзподільного каналу, віддає своє тепло зернам та охолоджується (при сушінні), або охолоджує зерно з видаленням вологи, що утворюється при самонагріванні (при активному вентиляванні зерна).

Недоліки активного вентилявання по вертикальному напрямку (рис. 1.4, а):

- значна товщина насипу потребує великих питомих енергозатрат;
- нерівномірна обробка зернової маси.

При малій товщині шару зерна під тиском повітря або утворюються капілярні канали, або шар зерна переходить у стан псевдозрідження (швидкість нагнітання – 2,5 м/с). Для рівномірного розподілу повітря в міжзерновому просторі при активному вентиляванні швидкість повітря на вході в шар зерна (швидкість фільтрації) приймають у межах 0,25...1,4 м/с залежно від висоти (товщини) шару зерна.

Зменшення висоти насипу не вирішує проблему, оскільки під тиском повітря в шарі з малою товщиною утворюються капілярні канали. При їх утворенні або відбувається псевдозрідження шару зерна при швидкості продування понад 2,5 м/с. Тому для рівномірного розподілу повітря в міжзерновому просторі швидкість повітря на вході в насип приймають у межах 0,25...1,0 м/с залежно від висоти насипу. Проте зменшення швидкості повітряного потоку знижує продуктивність технологічного обладнання.

Для зниження питомих витрат енергії та підвищення технологічної ефективності обробки зерна повітряним потоком було прийнято спосіб активного вентилявання через вертикальний повітророзподільний циліндричний канал з пористою поверхнею. Нагнітаємий знизу (рис. 1.4, б) або зверху (рис. 1.4, в) повітряний потік поступово проникає в міжзерновий

простір у горизонтальному напрямку по висоті насипу. При встановленні пристрою для видалення відпрацьованого повітря цей спосіб вважається ефективним. Як видно зі схем (рис. 1.4, б і в), товщина оброблюваного шару зерна значно менша, ніж у першому способі активного вентиляювання (рис. 1.4, а).

Недоліки активного вентиляювання повітрям по радіальному напрямку: по висоті насипу повітряний потік у міжзерновому просторі розподіляється нерівномірно. Швидкість повітряного потоку по висоті циліндричного каналу поступово зменшується, і по висоті насипу інтенсивність обробки зернин у міжзерновому просторі набуває нерівномірного характеру.

Для подальшого вдосконалення способу активного вентиляювання зерна було прийнято спосіб нагнітання повітряного потоку в міжзерновий простір по шарово-вертикальному напрямку (рис. 1.4, г). Суть цього способу полягає в тому, що бункер виконаний у вигляді пористого циліндра, через горизонтальну вісь якого проходить внутрішній повітророзподільний циліндр з пористою поверхнею, через який нагнітається повітряний потік у міжзерновий простір.

Переваги порівняно з попереднім способом - виключається переущільнення нижніх шарів зерна. Недолік цього способу полягає в зменшенні швидкості повітряного потоку по довжині повітророзподільного каналу.

У перевантажувальних пунктах зерносклади (елеваторів) для механізованого розвантаження зерна та одночасного його активного вентиляювання застосовують аерожелоби. Аерожелоб являє собою двосекційний канал завдовжки близько 8 м, шириною 0,22 м та глибиною 0,5 м. Верхня секція — повітророзподільна решітка у вигляді жолоба, виготовлена зі штампованого лускатого сита, яку встановлюють під невеликим кутом нахилу ($2...3^\circ$) від стіни складу до випускної воронки.

Модернізація нижньої частини завальної ями з можливістю подачі повітря через неї від систем активного вентилявання прискорює процес сушіння та підвищує продуктивність зерносушильних установок на 20–40 %.

До вентиляваних ємностей належать бункери (переважно вертикального типу), обладнані аеродинамічними пристроями — аерожелобами. Відомі конструкції аерожелобів з одноканальною або триканальною системою повітроподачі [76].

Основними недоліками традиційних конструкцій є значне енергоспоживання та високий рівень пиловиділення, що пов'язано з недосконалістю їхньої конструкції. Водночас головна перевага аерожелобів полягає у можливості забезпечення двох технологічних режимів післязбиральної обробки зерна - режиму активного вентилявання та режиму пневмовивантаження.

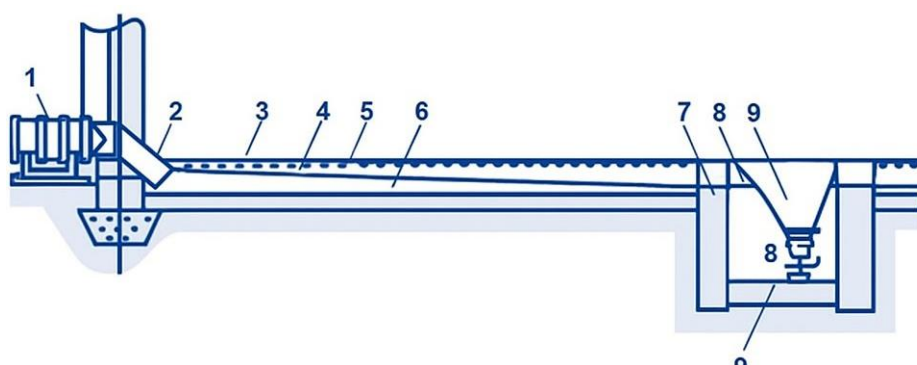


Рисунок 1.5 – Аерожелоб для транспортування та активного вентилявання зерна

1 – осьовий вентилятор; 2 – дифузор; 3 – запобіжна решітка; 4 – повітророзподільна решітка (лускате сито); 5 – канал для транспортування зерна; 6 – повітророзподільний канал; 7 – гальмівний пристрій; 8 – стрічковий конвеєр; 9 – випускна воронка.

Було встановлено, що при недостатній кількості повітря, яке нагнітається вентилятором у зернову насип, охолодження зерна відбувається дуже повільно, при цьому часто спостерігається запотівання та зволоження верхніх шарів зернової маси. Із підвищенням вологості зерна зростає потреба в подачі ненагрітого повітря в міжзерновий простір.

Мінімальна питома подача повітря та висота насипу зерна при
вентилюванні зерна різної вологості

Вологість зерна, %	Питома подача повітря, м ³ /(год·т), не менше	Висота насипу, м			
		Пшениця, жито, овес, ячмінь, кукурудза зерні	Просо	Горох, кормові бобові	Насіння соняшнику
16	30	3,5	2,2	3	3
18	40	2,5	2	2,5	2,5
20	60	2,0	1,8	2	2
22	80	2,0	1,6	2	1,8
24	120	2,0	1,5	2	1,5
26	160	2,0	1,5	2	1,5

Для зберігання зерна на складах з активним вентиляванням застосовують стаціонарні та напільно-переносні установки. Основними робочими органами стаціонарних установок активного вентилявання зерна є канали (повітропроводи), розташовані в підлозі зерносклади (рис. 1.6).

Для запобігання просипанню зерна у канали зверху бокових стінок встановлюють решітки. Для підтримання тиску повітря по мірі віддалення від дифузора переріз каналів по глибині поступово зменшують.

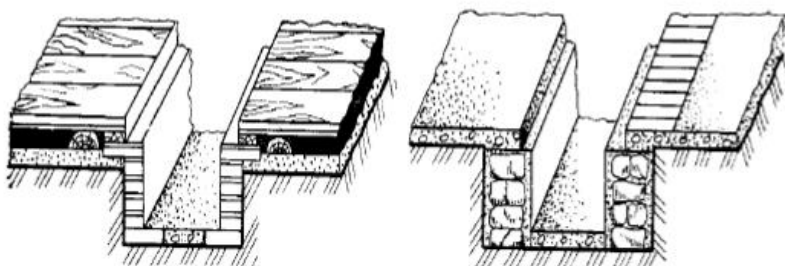


Рисунок 1.6 – Канали, прокладені у підлозі складу

Види повітророзподільних каналів у поперечному розрізі:
а – канал із цегли у складі з дерев'яною підлогою на лагах (ліворуч);
б – канали з каменю у складі з бетонною підлогою (праворуч).

Установка (рис. 1.7) для складу ємністю 3200 т має 20 секцій, розташованих по десять вздовж кожної поздовжньої стіни складу.

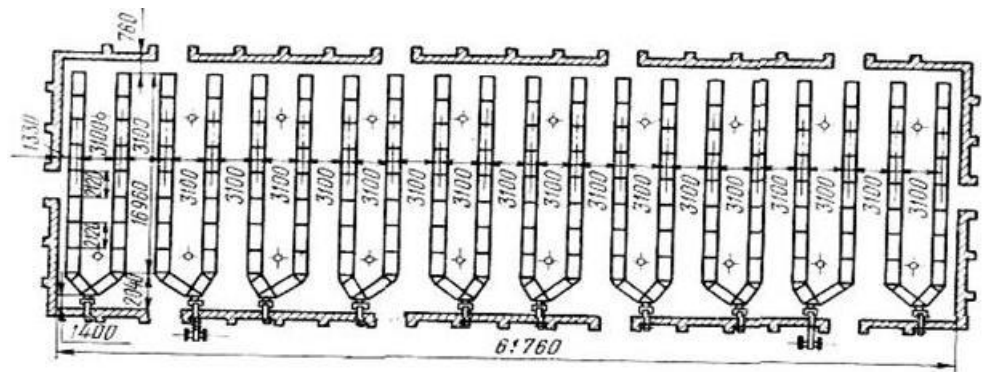


Рисунок 1.7 – Розташування каналів установки у складі ємністю 3200
ТОНН

Недоліком стаціонарних установок, які мають лише магістральні канали, є нерівномірний розподіл повітря та утворення застійних зон у зерновій насипі.

До стаціонарних установок для активного вентилявання зерна в складах з нахиленими підлогами відносяться установки одно-, дво-, чотирьох- та багатотрубні, а також установка типу «Каркас».

Недоліками поширених напільно-переносних і стаціонарних установок є також швидкий знос дерев'яних частин, нерівномірний розподіл повітряного потоку в насипі та утворення конденсату у верхніх шарах через значну товщину насипу.

У зерносховищах також використовують пересувні установки типу ПВУ-1 (рис. 1.8) та телескопічні вентиляційні установки ТВУ-2 і У1-УУТ.

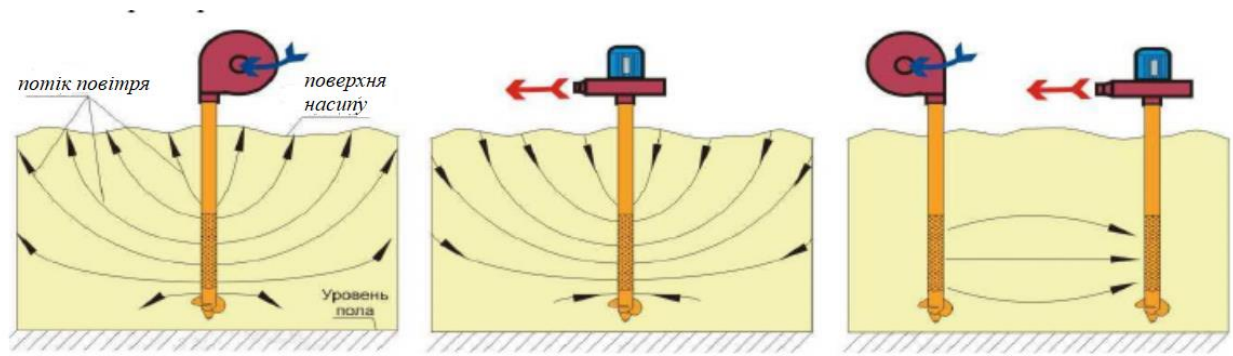


Рисунок 1.8 – Функціональна схема зерносушильної установки

а – нагнітання повітря у зернову насип; б – відсмоктування відпрацьованого повітря із зернової насипі; в – одночасне нагнітання та відсмоктування повітря із зернової насипі.

Їх можна застосовувати без переобладнання підлоги складу. Ці установки являють собою повітророзподільний канал у вигляді труби, який занурюється у зернову насип вертикально. Через ці труби повітряний потік або нагнітається в зернову масу (рис. 1.8, а), або всмоктується через зернову насип (рис. 1.8, б). При змішаній дії повітряний потік всмоктується відповідним каналом із нагнітального каналу в насипі (рис. 1.8, в).

Установки типу ПВУ з осередковою подачею повітря для вентилявання зернової маси застосовуються у складах з горизонтальною підлогою та на відкритих майданчиках. Залежно від умов експлуатації, вони можуть складатися з різної кількості секцій. У складах з горизонтальною підлогою секція містить вентилятор, розташований ззовні складу, магістральний канал та пересувні повітророзподільники.

Однак у конструкціях установок типу СВУ і в жодному з варіантів виконання установок типу ПВУ не передбачено можливості забезпечення рівномірного розподілу повітряного потоку в міжзерновому просторі по висоті насипу. У міру віддалення від повітророзподільної машини (при нагнітанні повітряного потоку) або наближення до неї (при всмоктуванні повітряного потоку з випаруваною вологою) швидкість повітряного потоку поступово або зменшується (в системі нагнітання), або збільшується (в системі всмоктування), що призводить до зниження ефективності процесу.

Для підвищення технологічної ефективності процесу експлуатації збільшують тиск у системі, однак такі заходи призводять до зростання енергетичних витрат.

Останніми роками на світовому ринку набули поширення зерносховища куполоподібної форми фірми «NAA» (США) (рис 1.7), у яких вентиляційна система охоплює весь об'єм зернової насипу в ємності.

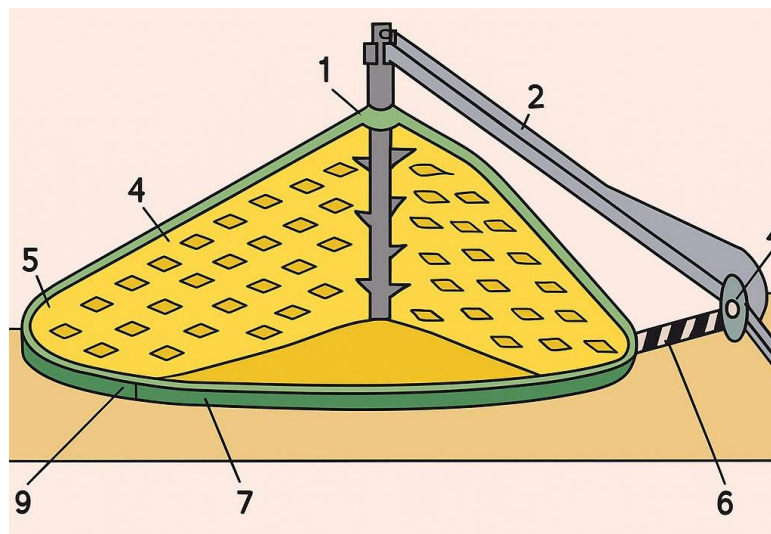


Рисунок 1.9 – Зерносховище з центральною системою вентиляції фірми «NAA» (США)

1 – транспортер для завантаження зерна; 2 – простір для зерна; 3 – пристрій для очищення зерна від домішок; 4 – вентиляційна система центральної башти; 5 – стіни з жалюзійними отворами; 6 – балки конічної форми; 7 – бетонна основа; 8 – повітряний канал; 9 – радіальний вентилятор.

Установка призначена для тривалого зберігання зерна. Її місткість становить від 9,5 до 55 тис. тонн, а висота — 16,7 м. Повітряні канали встановлюються на поверхні наземного покриття або під ним. На конусоподібні балки спираються стіни зерносховищ. Однак під час розроблення установки для активного вентилявання зерна у зерносховищах типу «NAA» не було враховано можливість конденсації випарованої вологи під час переміщення повітряного потоку у радіальному напрямку.

Установки для активного вентилявання зерна, які вбудовуються в силоси елеваторів, поділяються на три групи:

- із вертикальним продуванням усієї зернової маси знизу догори;
- із пошаровим вертикальним продуванням;
- із продуванням зернової маси в горизонтальному напрямку (рис. 1.10).

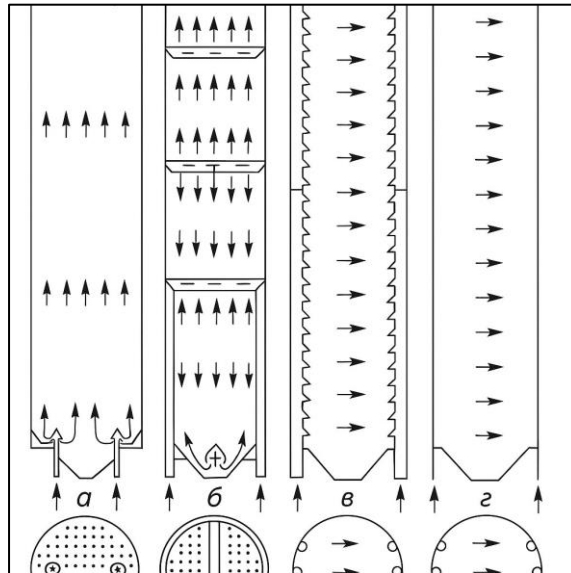


Рисунок 1.10 – Принципові схеми установок

а – вертикального, б – вертикально-пошарового, в – горизонтального продування зернової маси в силосах елеваторів.

Перша група установок (рис. 1.10, а) складається з труб, верхні кінці яких знаходяться всередині силосу та закінчуються конусоподібними ковпаками. До нижніх кінців цих труб під'єднані гнучкі сталеві рукави, до яких підключають високонапірний стаціонарний вентилятор. Для продування стовпа зернової маси висотою 25–30 м використовують вентилятори високого тиску. Такі установки потребують менших капітальних витрат і зручні в експлуатації. Проте подача великого об'єму повітря вимагає значного споживання електроенергії, а в даному способі подачі нагрітого повітря не врахована можливість конденсації випарованої вологи всередині насипу зерна.

Спосіб вертикально-пошарового вентилявання зерна прийнятий з урахуванням видалення випарованої вологи, не допускаючи її конденсації (рис. 1.10, б). Друга група установок для пошарово-вертикального продування

повітря складається з нагнітальних і всмоктувальних пристроїв, розташованих по висоті силосу. Установки такого типу підвищують технологічну ефективність процесу активного вентилявання зерна, оскільки відпрацьоване повітря відсмоктується по висоті через кожні 2–3 метри. Проте встановлення всмоктувальних і нагнітальних пристроїв у силосах ускладнює конструкцію силосу і займає корисну площу ємності, що зменшує її місткість.

До третьої групи (рисунок 1.10, в, г) відносяться силоси, обладнані установками для поширення повітряного потоку в горизонтальному напрямку, які складаються з нагнітальних і всмоктувальних повітропроводів.

Нагнітальні та всмоктувальні повітропроводи встановлюються один навпроти одного (або по кутах) всередині силосу по всій його висоті і оснащені клапанами чи заслінками для регулювання подачі та всмоктування повітря. Повітря подається через одну частину труб, а через протилежну – відсмоктується.

Технологічна ефективність таких установок зменшується через горизонтальний рух повітря крізь щільний шар зерна: повітря втрачає швидкість під час проходження міжзернового простору, особливо у великих силосах. Зменшення діаметра силосу підвищує швидкість повітря, але знижує його місткість.

Наприклад, в установках типу У1-УВС в силосах елеваторів встановлюють вентиляційні труби для нагнітання і відсмоктування повітря. Для рівномірного продування зернової маси по висоті силосу кожна труба має 11–13 секцій з різним перерізом. Спочатку повітря подається через нагнітальний канал і за допомогою вентилятора направляється у вентиляційні труби силосу.

Жалюзійні установки У1-УВС мають п'ять модифікацій (рис. 1.11).

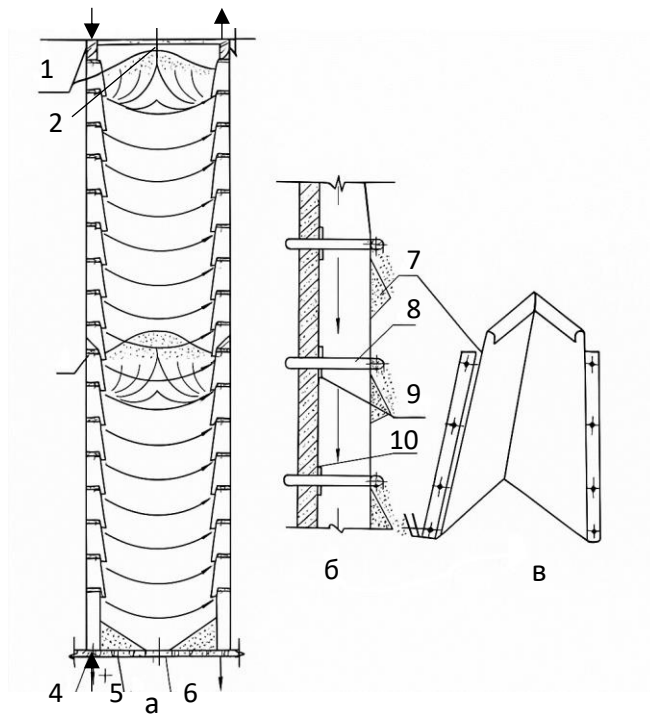


Рисунок 1.11 – Жалюзійна установка

а – схема вентилявання; б – частина жалюзійного каналу; в – кутова лата для квадратного або прямокутного силосу. 1, 4 – патрубки, верхній і нижній; 2, 6 – люки, верхній і нижній; 3 – глуха перегородка; 5 – днища; 7 – вертикальний жалюзійний канал 8 – штифт; 9 – обмежувач штифта; 10 – стіна силосу.

У жалюзійній установці повітропроводи утворені металевими латами, які навіщуються верхніми загнутими кромками на штифти, вмонтовані у стіни силосу. Лати щільно прилягають боковими кромками до стін, закріплені дюбелями. У силосах висотою понад 20 м канали розділені перегородкою на дві секції – нижню та верхню, що дозволяє обробляти зерно у частково завантаженому силосі. У круглих силосах діаметром до 6 м канали розташовуються попарно навпроти один одного з відстанню між осями близько 0,4 м.

Бункер активного вентилявання зерна з перфорованою стінкою та внутрішніми концентричними циліндрами для послідовного сушіння по черзі завантаженої маси зерна (рис.1.12).

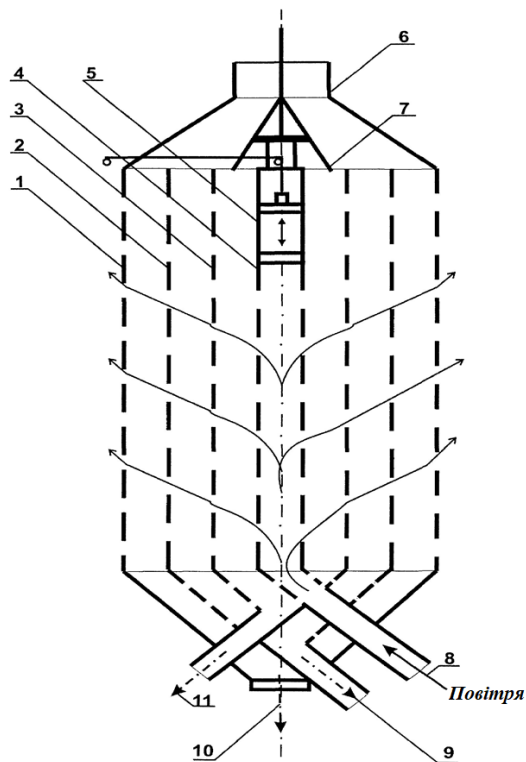


Рисунок 1.12 – Подовжній переріз трисекційного бункера для зберігання та вентилявання зерна

1 – зовнішній перфорований циліндр; 2, 3, 4 – концентричні перфоровані циліндри; 5 – поршень; 6 – завантажувальний патрубок; 7 – конусний розподільник зерна; 8 – повітропровід; 9, 10, 11 – розвантажувальні труби та патрубок (10).

Зерно надходить у бункер через завантажувальний патрубок 6 при регульованій максимальній конусності розподільника зерна 7 таким чином, щоб спочатку завантажувалася зовнішня вертикальна порожнина бункера. Після завантаження навіть невеликої партії зерна можна починати активне вентилявання. Для цього поршень 5 опускають нижче верхньої кромки зерна і запускають процес.

Через невеликий опір у порожніх зонах бункера більша частина повітряного потоку піднімається до завантажувального отвору, де здійснюється активне вентилявання зерна. Менша частина повітря проходить через зерновий шар у зовнішній зоні в радіальному напрямку. Тобто ще в процесі завантаження починається активне вентилявання зерна в найвіддаленішій від центрального повітропроводу зоні бункера.

Після заповнення зерном зовнішньої порожнини (між циліндрами 1 і 2) кут конусності розподільника зерна 7 зменшують і переходять до заповнення порожнини між циліндрами 2 і 3. Починається процес активного вентилявання зернової маси, що завантажується у дану вертикальну циліндричну порожнину.

Після заповнення цієї порожнини ще більше зменшують кут конусності розподільника, щоб почалося завантаження зерна у вертикальну циліндричну порожнину між циліндрами 3 і 4. Така технологія завантаження дозволяє інтенсивніше продувати зерно під час його завантаження та на першому етапі сушіння більш рівномірно висушити зерно по горизонтальному шару.

Основний недолік способу активного вентилявання або сушіння зерна, цього способу, полягає у малій продуктивності, нестабільності технологічного режиму процесу та складності конструкції.

Відомий винахід у вигляді бункера активного вентилявання зерна з порожнистим барабаном, обладнаним металевими стрижнями для перемішування зернової маси під час активного вентилявання. Бункер активного вентилявання зерна (рис. 1.13) складається з перфорованого циліндра 1, повітропроводу 2, електродвигуна 4, порожнистого барабана 5, калорифера 6, вентилятора 7, люка 8 та опори 10.

Всередині перфорованого циліндра розташований обертовий порожнистий барабан з металевими стрижнями круглої форми, розміщеними по периметру барабана у чотири ряди. Порожнистий барабан обладнаний власним приводом, що складається з електродвигуна та редуктора.

За оцінкою розробників, підвищення технологічної ефективності процесу активного вентилявання зерна (сушки) може бути забезпечене за рахунок рівномірного розподілу теплоносія (нагнітаного повітряного потоку) по всій товщині зернової маси, розташованої в перфорованому циліндрі 1 (рис. 1.13).

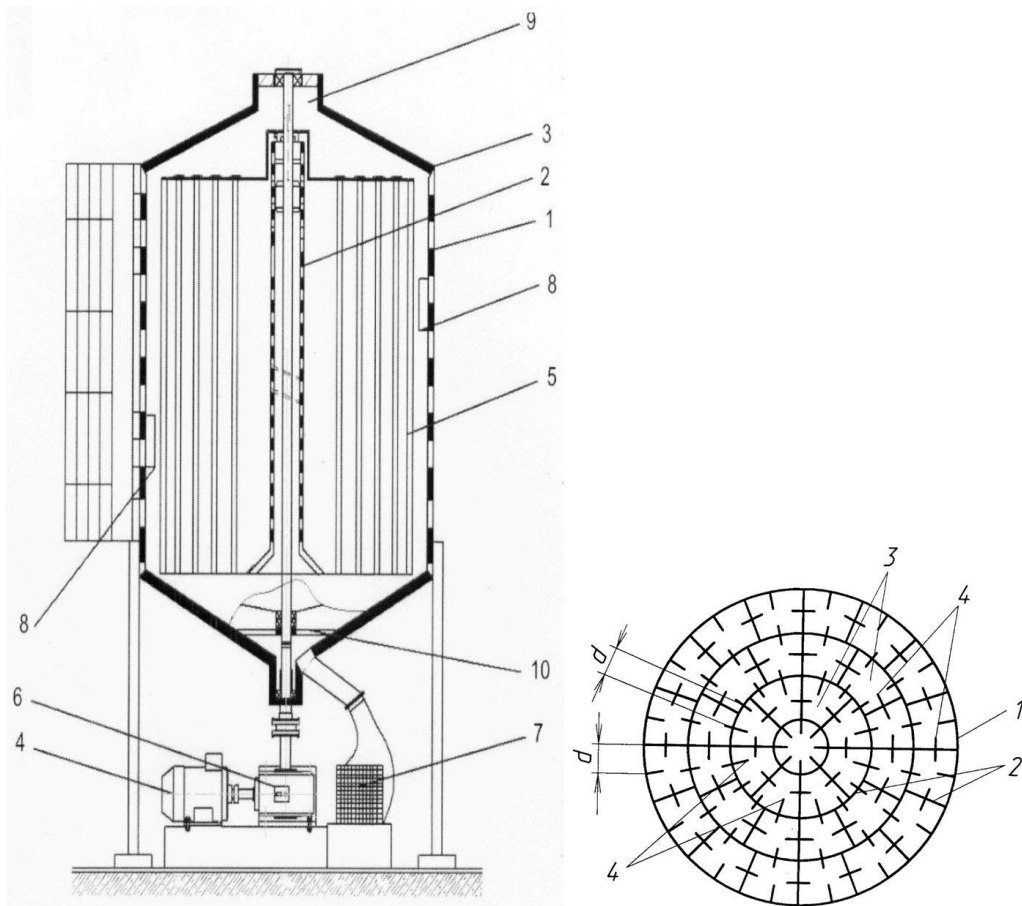


Рисунок 1.13 – Бункер активного вентилявання зерна

а: 1 – ємність у вигляді перфорованого циліндра; 2 – повітропровід; 3 – кришка ємності; 4 – електродвигун; 5 – порожнистий барабан; 6 – калорифер; 7 – вентилятор; 8 – люк; 9 – приймальний патрубок; 10 – підшипникова опора.
б: 1 – стінка ємності; 2 – перегородки; 3 – комірки; 4 – ребра жорсткості.

Сире зерно надходить у приймальний патрубок (9) і заповнює перфорований циліндр (1). Теплогенератор (7) подає нагріте повітря в повітропровід (2), а порожнистий барабан (5) обертається, перемішуючи зерно та рівномірно розподіляючи його по циліндру. Це забезпечує ефективне сушіння або активне вентилявання та прискорює видалення вологи.

Основні недоліки конструкції:

- травмування зерна під час перемішування;
- підвищені експлуатаційні витрати через обертовий барабан та нагрівальні і повітряні елементи.

Пропонується спосіб сушіння та зберігання зерна активним вентиляванням (рисунок 1.14), при якому зерно пошарово завантажується в ємність з

контролем зниження вологості на поверхні попереднього шару. Це дозволяє підвищити рівномірність сушіння та зменшити ризик перезволоження нижніх шарів зерна.

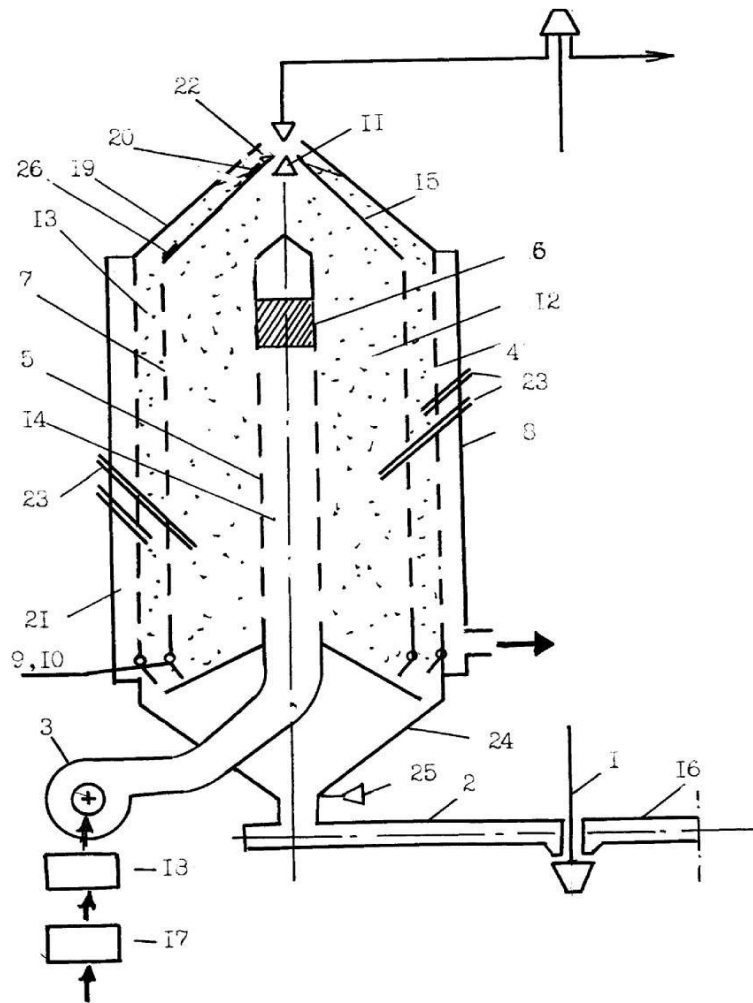


Рисунок 1.14 – Установа для активного вентилявання зерна

1 – норія; 2 – розвантажувальний шнек; 3 – вентилятор; 4 – зовнішня перфорована стінка; 5 – внутрішня перфорована стінка; 6 – поршень; 7 – додаткова перфорована стінка; 8 – кожух; 9, 10 – клапани на виході зерна з ємності; 11 – клапан на вході; 12 – камера досушування; 13 – камера підсушування зерна; 14 – повітророзподільча камера; 15 – конусне дно камери підсушування; 16 – завантажувальний шнек; 17 – калорифер; 18 – озонатор; 19 – дах бункера; 20 – датчик верхнього рівня; 21 – камера відпрацьованого агента сушіння; 22 – захисний пристрій датчика; 23 – патрубки; 24 – днище; 25 – клапан днища; 26 – датчик верхнього рівня.

Зерно завантажується шаром 0,25–0,35 м, при потребі рециркулюється та вентиляється; при самозігріванні $>2^{\circ}\text{C}$ – охолоджується. Використовується свіжий або відпрацьований агент сушіння до кондиційної вологості; можливе

додавання озону. Кільцева робоча камера з внутрішньою та зовнішньою перфорованими стінками. Камера ділиться на зовнішню підсушувальну та камеру досушування. Полості камер з'єднані із завантажувальними та розвантажувальними пристроями, оснащені клапанами для роздільного заповнення та спорожнення. Зовнішня перфорована стінка розташована в суцільному кожусі із зазором для проходу повітря.

Установка (рис. 1.15) складається з бункера, обладнаного спіральними каналами для подачі робочого агента (теплоносія) та видалення випарованої вологи разом із обробленим повітряним потоком. Конструкція забезпечує рівномірний розподіл повітряного потоку в міжзерновому просторі, що виключає необхідність визначення ділянок самонагріву зерна в бункері. Проте в даній установці не передбачено умов для регулярного контролю стану зерна та режиму активного вентиляювання (сушки).

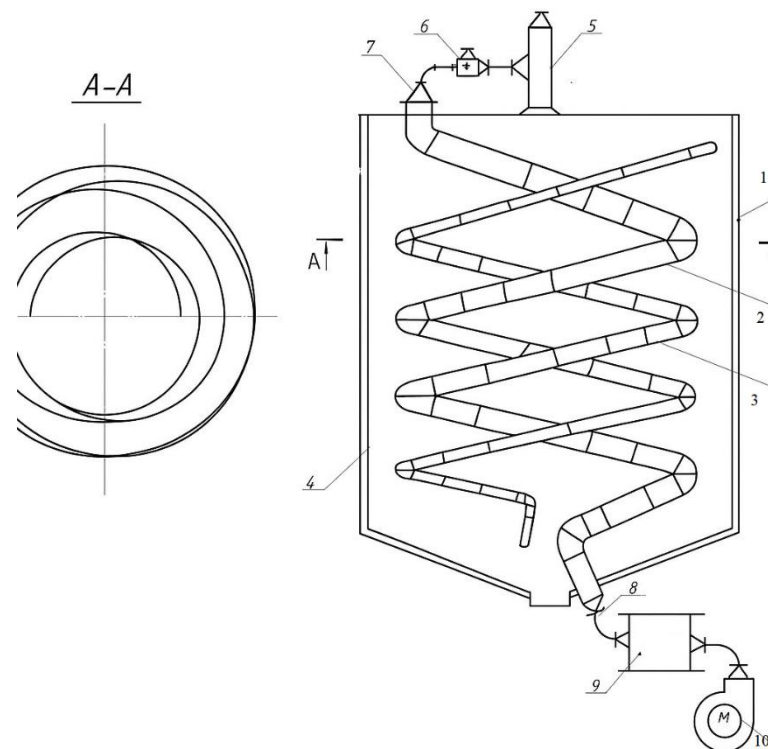


Рисунок 1.15 – Конструкція вентиляованої ємності

1 – корпус; 2 – всмоктувальний канал; 3 – повітроподаючий канал; 4 – перфорована ємність; 5 – всмоктуючий вентилятор; 6 – конденсатор; 7, 8 – всмоктуючий та нагнітаючий патрубки; 9 – електронагрівач; 10 – нагнітаючий вентилятор.

Існуючі способи активного вентилявання зерна мають наступні недоліки:

1. Низька технологічна ефективність. Робочий агент (повітряний потік) розподіляється в міжзерновому просторі нерівномірно, що знижує ефективність процесу активного вентилявання або сушіння.

2. Високі питомі енергетичні витрати. Для їх зменшення підвищують інтенсивність обробки зерна, збільшуючи швидкість повітряного потоку, або зменшують обсяг вентилюємої маси зерна. Обидві міри призводять до зростання собівартості процесу через зниження продуктивності технологічного обладнання.

Висновки:

Аналіз конструкцій відомих способів очистки зерна від легких домішок та активного вентилявання показав їхні переваги та недоліки. Проведено огляд існуючих технологій та обладнання, включно з установками для псевдооживлення шару зерна.

Відомі способи активного вентилявання та відповідні установки мають такі основні недоліки:

1. Низька технологічна ефективність. Робочий агент (повітряний потік або нагрітий повітряний потік) розподіляється в міжзерновому просторі нерівномірно, що призводить до нерівномірної обробки зерна та знижує ефективність його зберігання.

2. Високі питомі витрати. Для зменшення витрат на практиці підвищують інтенсивність обробки (збільшують швидкість повітряного потоку) або зменшують обсяг вентилюваного зерна. Це, у свою чергу, підвищує собівартість процесу та знижує продуктивність установки.

3. Складність конструкції та експлуатації. Наявність регулювальних механізмів для подачі повітря ускладнює конструкцію обладнання та збільшує експлуатаційні витрати.

2 ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ПРОЦЕСІВ ОЧИСТКИ ЗЕРНА ВІД ЛЕГКИХ ДОМІШОК У ПОТОЦІ ТА СУШІННЯ ЗЕРНА СПОСОБОМ АКТИВНОГО ВЕНТИЛЮВАННЯ

2.1 Вибір ефективного способу поточної очистки зерна від легких домішок та раціональної конструкції пристрою (пневмокамери)

Задача вибору раціонального способу очистки зерна від легких домішок у пунктах перегрузки зерна (механізовані склади, елеватори) пов'язана з очікуваним підвищенням технологічної ефективності процесу, покращенням санітарно-гігієнічних умов, зменшенням пиловиділення, зниженням собівартості очищення та зменшенням інтенсивності самонагрівання зерна у емкостях (бункери, силоси, закрома).

При виборі способу очищення доцільно враховувати фізико-механічні властивості зерна, зокрема сипучість. Сипка маса при вертикальному переміщенні зверху вниз може природно розпушуватися за допомогою елемента на вході в зону очищення, що дозволяє уникнути створення енергозатратного псевдозрідженого шару зерна.

Основні елементи запропонованого пристрою: вертикальні жалюзійні решітки для подачі повітряного потоку та виведення аеросуміші (повітря + легкі домішки), з'єднані з системою аспірації через патрубки. Простір між жалюзійними решітками утворює робочу камеру.

Відмінні ознаки конструкції пневмокамери:

1. Розташування жалюзі: смуги решіток під певним кутом та паралельно напрямку повітряного потоку забезпечують, що легкі домішки не повертаються у камеру. Зазор між смугами для подачі повітря не більше 20 мм, для виведення аеросуміші – не менше 40 мм.

2. Перфорація смуг решіток: отвори перфорації відповідають ширині повітряних щілин. Менші зазори збільшують гідравлічний опір, що забезпечує рівномірний розподіл повітряного потоку у міжзерновому просторі.

Конструкція пневмокамери наведена на рисунку 2.1.

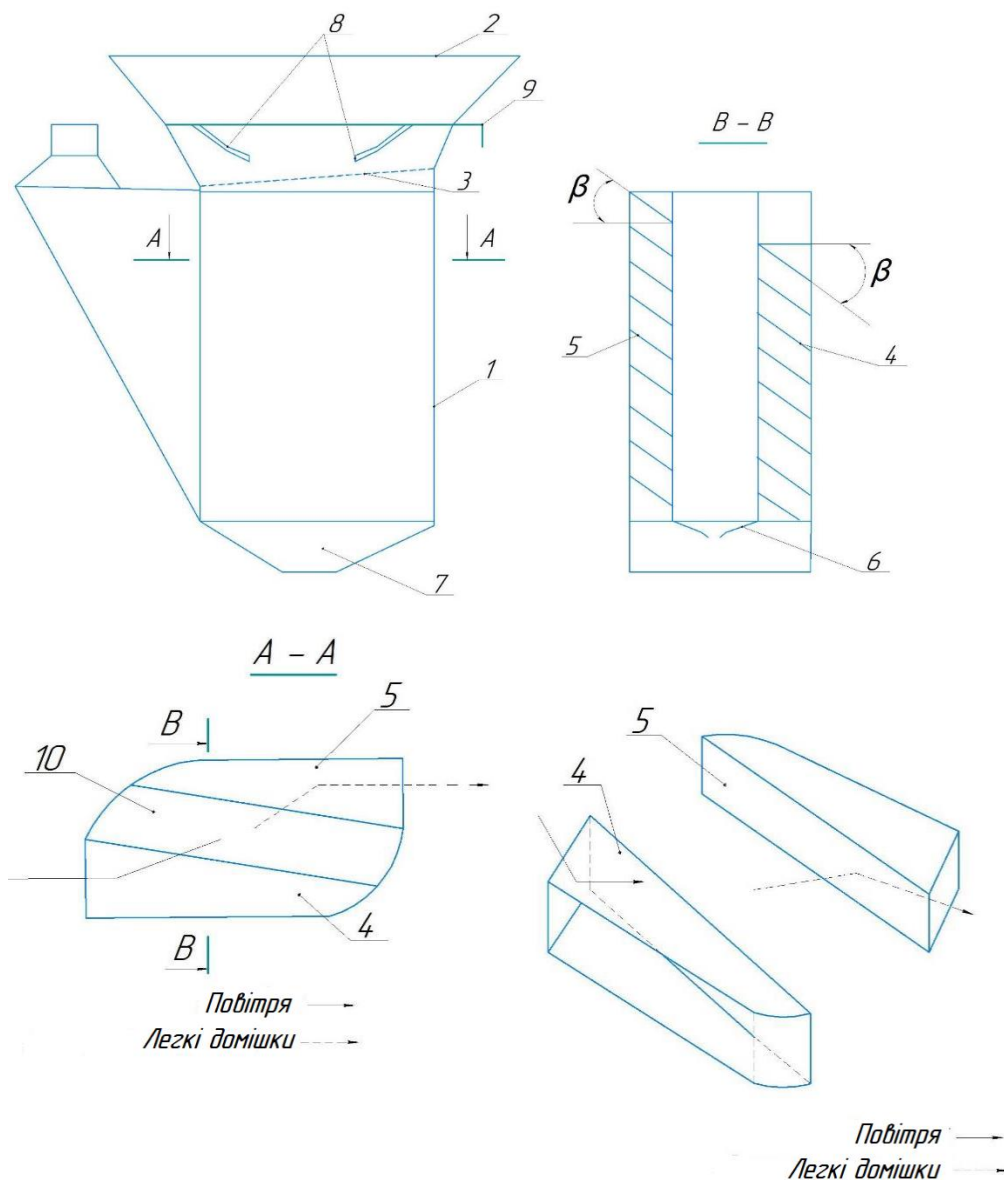


Рисунок 2.1 – Схема пневмокамери

а) загальний вигляд пневмокамери; б) розріз у січенні А-А (вид зверху); в) розріз жалюзі у січенні В-В (вид збоку); г) жалюзійні решітки для подачі повітряного потоку та виведення аеросуміші. 1 – корпус; 2 – приймальний бункер; 3 – решітка для розпушування зерна; 4, 5 – жалюзійні решітки патрубків для подачі повітря та виведення аеросуміші; 6, 8 – гнучкі фартухи; 7 – розвантажувальний патрубков; 9 – заслінка; 10 – робоча камера.

Пневмокамера для очищення зерна від легких домішок (рис. 2.1) має робочу зону, утворену між вертикальними жалюзійними решітками в патрубках; вид зверху – у січенні А-А, вид збоку – у січенні В-В. Жалюзійні решітки забезпечують подачу повітряного потоку та відвід аеросуміші.

Камера складається з корпусу 1, приймального бункера 2, решітки для розпушування зерна 3, жалюзійних патрубків для подачі повітря 4 та виводу аеросуміші 5, гнучких фартухів 6 і 8 для запобігання підсосу повітря, розвантажувального патрубка 7 та робочої камери 10, що утворюється між жалюзійними патрубками 4 і 5.

Принцип роботи: зерно з приймального бункера через розпушувальну решітку надходить у робочу камеру в розпушеному стані. Тут повітряний потік, всмоктуваний вентилятором системи аспірації, проходить крізь шар зерна, легко проникаючи в межзерновий простір. Легкі домішки разом з повітрям (аеросуміш) відводяться через жалюзійну решітку відповідного патрубка, а очищене зерно під дією сили тяжіння спрямовується до розвантажувального патрубка.

Використання пневмокамери у приймальних і перегрузочних пунктах елеваторів та інших механізованих зернохранилищ підвищує технологічну ефективність очищення зерна при низьких енерговитратах, що сприяє зниженню собівартості процесу та підвищенню ефективності стаціонарного зберігання зерна в бункерах, силосах та зерносховищах.

2.1.1 Моделювання процесу очищення зерна від легких домішок у висхідному повітряному потоці

При вільному падінні вниз у повітряному середовищі зернові частки долають аеродинамічний опір повітря, що залежить від їхніх розмірів, форми, маси та розташування у висхідному повітряному потоці. Чим більше опір повітря, тим повільніше рухається падаючий потік зерна. На цьому принципі базується процес виділення легких домішок із шару зерна у горизонтально або вертикально спрямованому висхідному повітряному потоці.

Елементарна частка m , розташована в каналі під решіткою, продувається повітрям знизу вгору. На частку у вертикальному висхідному потоці діють

сили: сила тяжіння G , гідравлічний опір R , який менший за виштовхувальну силу повітря F (рис. 2.2).

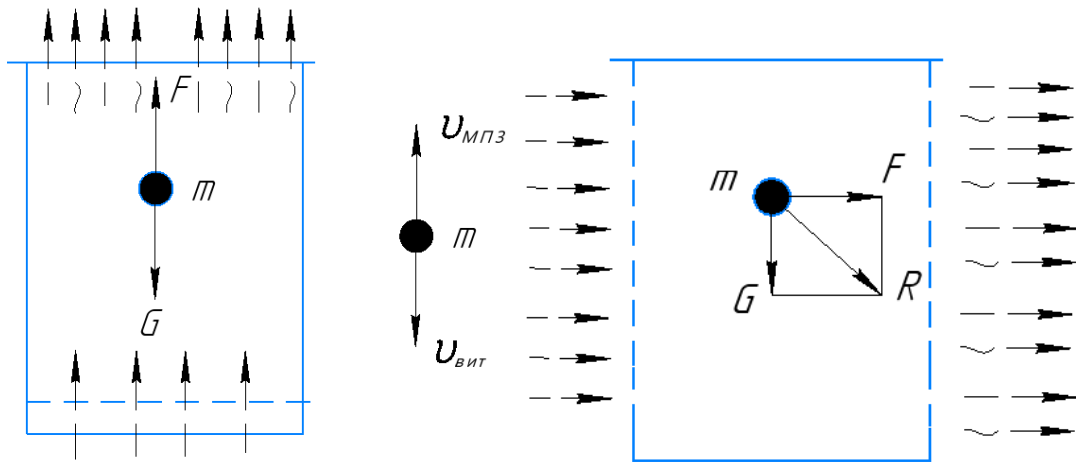


Рисунок 2.2 - Схеми сил, що діють на зернівку m у висхідному повітряному потоці: вертикальному (а) та горизонтальному (б) напрямках

Якщо $G > R$, то частинка m падає вниз; якщо $R > G$, частинка m рухається вгору; при рівності сил $G = R$ частинка перебуває у стані зависання, тобто нерухомо відносно стінок каналу.

Швидкість вертикального повітряного потоку, при якій тіло перебуває у завислому стані, називають швидкістю зависання або критичною швидкістю $w_{кр}$ даного тіла. Зернову суміш можна розділити у повітряному потоці лише тоді, коли критичні швидкості насіння та домішок різні.

1. На початковому етапі руху твердих частинок (зерна) у газовому середовищі (повітрі) рівняння руху має вигляд:

$$G - R - A = ma \quad (2.1)$$

де ma – сила на початковому етапі при несталому русі, яка через квадратичне збільшення сили опору R швидко стає рівною нулю ($R \rightarrow 0$). Тому рівняння рівноваги має вигляд:

$$G - R = 0 \quad (2.2)$$

2. При падінні потоку зерна з бункера в робочу камеру вся потенційна енергія E_p (Дж) маси зерна M (кг) переходить у кінетичну енергію E_k потоку, при цьому швидкість потоку зростає від v_0 до v_1 :

$$E_n = Ek \quad (2.3)$$

$$MgH = Mv_1^2 \quad (2.4)$$

$$E_n = Mg \cdot \sin\alpha \cdot H \sin\alpha - Mg \cdot f \cdot \cos\alpha \cdot H \sin\alpha \quad (2.5)$$

$$MgH \cdot (1 - f \cdot \operatorname{ctg}\alpha) = M \frac{(v_1^2 - v_0^2)}{2} \quad (2.6)$$

де:

H – висота шару зерна в бункері, м;

f – коефіцієнт тертя зерна об поверхню бункера;

α – кут нахилу поверхні бункера;

v_0, v_1 – початкова та кінцева швидкості, м/с.

Рівняння відображає математичну модель руху потоку зерна з приймального бункера у пневмокамеру при вільному падінні. У першому наближенні, якщо $v_0 = 0$, рівняння набуває вигляду:

$$gH \cdot (1 - f \cdot \operatorname{ctg}\alpha) = \frac{v_1^2}{2} \quad (2.7)$$

Диференціальне рівняння об'ємного витрати повітря при проходженні через пористе середовище:

$$dV_c = k_p \cdot \frac{\Delta p_{\text{мзп}}^2}{2\mu p_0 \delta^2} dF_p \quad (2.8)$$

де:

k_p – коефіцієнт проникності міжзернового простору ($k_p = 1/k_{\text{мзп}}$);

$\Delta p_{\text{мзп}}$ – втрати тиску у міжзерновому просторі, Па;

p_0, p_1 – тиск повітря до і після міжзернового простору, Па;

μ – динамічний коефіцієнт в'язкості повітря, Па·с;

δ – товщина шару зерна в камері, м;

F_p – площа робочої зони камери у перетині, м², де B і b – довжина та ширина робочої зони ($F_p = B \cdot b$) (м).

Швидкість повітря в міжзерновому просторі визначається за рівнянням:

$$V_{мзн} = k_p \cdot \frac{\delta^2 \cdot \Delta p_{мзн}}{\mu} \quad (2.9)$$

де $k_p = \varepsilon$ – коефіцієнт проникності пористої середовища, δ – товщина шару зерна, $\Delta p_{мзн}$ – перепад тиску у міжзерновому просторі, μ – динамічна в'язкість повітря.

Масовий витрата повітря визначається як:

$$M_v = \rho \cdot V_v \quad (2.10)$$

Диференціальне рівняння зміни масового витрати повітря у міжзерновому просторі:

$$dM_v = k_p \cdot \frac{\rho \cdot \Delta p_{мзн}^2}{2\mu p_0 \delta^2} dF_p \quad (2.11)$$

Коефіцієнт проникності міжзернового простору визначається як:

$$k_p = \frac{2\mu p_0 \delta^2 V_c}{F_p (\Delta p_{мзн})^2} \quad (2.12)$$

Об'ємна витрата повітря:

$$V_c = \frac{k_p B \cdot b (\Delta p_{мзн})^2 \rho}{2\mu p_0 \delta} \quad (2.13)$$

Зв'язок між об'ємним витратою і швидкістю повітря у камері:

$$V_c = F_p \cdot v_1 \quad (2.14)$$

Критична швидкість підйому частинок:

$$v_{кр} = \sqrt{g K_p} \quad (2.15)$$

де K_p – коефіцієнт парусності зерна (для пшениці 8–11,5 м/с).

Швидкість вільного падіння зерна з бункера у камеру:

$$v = \sqrt{2gH(1 - f \cdot ctg \alpha)} \quad (2.16)$$

Умовою підйому частинок та видалення легких домішок горизонтальним потоком є: $v > v_{кр}$

Таким чином, повна математична модель процесу очистки зерна:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 MgH(1 - f \cdot ctg \alpha) = M(v_1^2 - v_0^2) / 2 \\
 v = \sqrt{2gH(1 - f \cdot ctg \alpha)} \\
 dV_c = k_p \cdot \frac{\Delta p_{мзн}^2}{2\mu p_0 \delta^2} dF_p \\
 \Delta p_{реи} = \rho \cdot v_1(v_1 - v_2) \cos \gamma / 2 + \rho v_1^2 / 2 \\
 V_{мзн} = k_p \cdot \frac{\delta^2 \cdot \Delta p_{мзн}}{\mu} \\
 v_{кр} = \sqrt{gK_p}
 \end{array} \right. \quad (2.17)$$

2.2 Вибір способу активного вентилявання та конструкції установки для сушіння зерна

Під час активного вентилявання зерна важливо враховувати, що неправильний вибір способу або ігнорування стану зернової маси може негативно вплинути на її якість. Одним із ключових параметрів є товщина шару зерна, оскільки під час сушіння волога з нижніх шарів, піднімаючись угору, може конденсуватися у верхніх шарах, спричиняючи їх повторне зволоження.

Температура нагрітого повітря також повинна бути раціональною та рівномірно розподілятися по всьому об'єму зернової маси. Дослідження показують, що при активному вентиляванні температура зерна не повинна перевищувати 45 °С, щоб уникнути денатурації клейковини та зниження активності ферментів.

Під час охолодження зерна температура повітря, як правило, відповідає температурі навколишнього середовища. При штучному охолодженні слід використовувати повітря з низькою вологістю, щоб забезпечити відведення вологи з міжзернового простору.

Надто повільне охолодження через недостатню подачу повітря може спричинити «відпотівання» і зволоження верхніх шарів зерна. Тому швидкість

руху повітря є визначальним параметром ефективності процесу активного вентиляювання при сушінні та зберіганні зерна.

Як видно з табл. 1.1, висота шару зерна значно впливає на ефективність активного вентиляювання (K_{ef}). Для усунення цього впливу слід обирати раціональний спосіб вентиляювання та конструкцію установки.

У більшості систем активного вентиляювання витрату повітря регулюють зміною висоти шару зерна без зміни габаритів бункера. При радіальному розподілі повітря швидкість потоку вища біля центральної труби та нижча на периферії, що призводить до нерівномірного висушування. Для вирівнювання вологості застосовують періодичне перемішування зерна, але це викликає травмування, дроблення та додаткові енерговитрати.

Недоліком систем із перфорованими стінками є конденсація теплого повітря, що може спричинити самозігрівання околостінного шару зерна. Запропонований спосіб передбачає горизонтальний розподіл повітря через перфоровану центральну трубу та відсмоктування відпрацьованого теплоносія спіралеподібною трубою, розташованою біля стінки бункера (рис. 2.3).

Запропонована конструкція установки активного вентиляювання зерна дозволяє усунути необхідність виготовлення ємностей із додатковим перфорованим внутрішнім корпусом та встановлення всередині спеціальних інвенторів для перемішування зернової маси, що сприяє зниженню капітальних витрат на виготовлення елеваторних силосів та бункерів типу БВ-25 і БВ-40.

Активне вентиляювання або сушка зерна у даній установці забезпечує рівномірний розподіл повітряного потоку в міжзерновому просторі, виключає конденсацію вологи та підвищує ефективність тепло- та масообміну. Установка складається з двох основних систем: системи активного вентиляювання зерна та системи аспірації для відведення відпрацьованого повітря з випарованою вологою (рисунок 2.5).

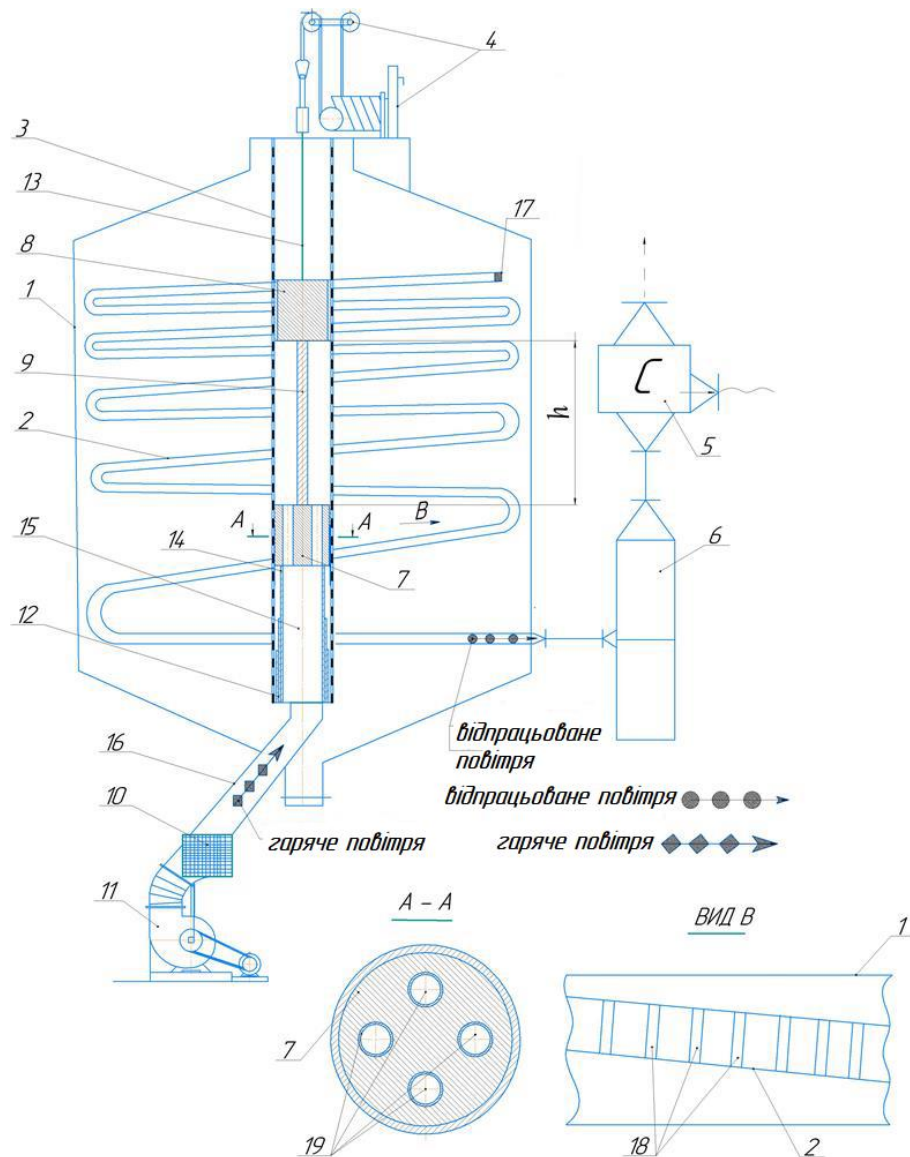


Рисунок 2.3 – Принципова схема установки активного вентилявання зерна:

1 – циліндрична ємність; 2 – спіралеподібна всмоктувальна труба; 3 – центральна газорозподільна труба; 4 – лебідка; 5 – конденсатор; 6 – всмоктувальний вентилятор; 7 – нижній поршень; 8 – верхній поршень; 9 – шток; 10 – калорифер; 11 – нагнітальний вентилятор; 12 – нижній кінець телескопічної труби; 13 – трос; 14 – верхній кінець телескопічної труби; 15 – телескопічна труба; 16 – магістральна труба; 17 – заглушка.

Система вентиляції зернової маси включає підвідну циліндричну газорозподільну трубу з сітчастою поверхнею для рівномірної подачі повітря у міжзерновий простір та нагнітальний вентилятор. Система аспірації оснащена спіралеподібним каналом, розташованим уздовж внутрішньої стінки ємності, який забезпечує відведення відпрацьованого повітря та конденсованої вологи. Отвори спіралі виконані розміром 2×15 мм із кроком 5

см, що запобігає потраплянню зерна до аспіраційного каналу та забезпечує рівномірне відсмоктування вологи.

Для регулювання висоти продувної зони всередині газорозподільної труби встановлено два поршні, з'єднані штоком. Висота простору між поршнями може змінюватися, що дає можливість локального впливу на осередки самозігрівання зернової маси.

Принцип роботи установки полягає у наступному: нагнітальний вентилятор подає повітря через калорифер та магістральний повітропровід у центральну газорозподільну трубу, звідки повітря рівномірно проникає у міжзерновий простір. Відпрацьоване повітря разом із вологою відсмоктується спіралеподібною трубою за допомогою всмоктувального вентилятора та надходить у конденсатор, після чого виводиться в атмосферу.

Застосування запропонованої конструкції забезпечує рівномірний розподіл повітряних потоків у міжзерновому просторі, ефективне видалення вологи, запобігає конденсації та дозволяє здійснювати локальне вентилювання або сушку окремих шарів і осередків самозігрівання зерна.

2.2.1 Моделювання процесу сушіння зерна способом активного вентилювання

Нагнітальний вентилятор створює рух нагрітого повітряного потоку в трубі, що описується рівняннями Ейлера, які справедливі для рідкої та газової середовищ (при ступені стиснення $n < 1,2$). У стислій формі ці рівняння руху потоку реальної газової середовища можна представити як систему:

$$\begin{cases} X - P_x + I_x + N_x = 0 \\ Y - P_y + I_y + N_y = 0 \\ Z - P_z + I_z + N_z = 0 \end{cases} \quad (2.18)$$

де P_x, P_y, P_z – одиничні координатні сили тиску, Н/кг; I_x, I_y, I_z – одиничні сили інерції, Н/кг; N_x, N_y, N_z – одиничні сили тертя, Н/кг; X, Y, Z – одиничні масові сили, Н/кг.

Сушильна установка. Повітряний потік проходить через центральну вертикальну перфоровану трубу, а потім через шар зерна, насипаного в кільцеподібному перерізі камери. Внаслідок тепло- та масообміну відбувається сушіння матеріалу (пшениці), після чого вологе повітря видаляється через спіралеподібну трубу, з'єднану з всмоктуючим вентилятором. Процес сушіння носить періодичний характер.

Основними фізичними параметрами є:

- опір шару зерна Δp_c , Па;
- тепло- та масообмін при сушінні, тобто кількість видаляємої вологи W , кг;
- швидкість процесу сушіння u_c ;
- зміна температури у зоні сушіння Δt , °С;
- необхідний час процесу τ , с.

Математична модель досліджуваного процесу відображає функціональний зв'язок між параметрами в стаціонарному (статичному) та нестаціонарному (динамічному) станах і дозволяє описати потоки речовини та енергії при достатньо простому математичному описі.

Модель сушіння зерна як детермінованого процесу задається диференціальними рівняннями в частинних похідних і є моделлю з розподіленими параметрами, оскільки основні величини змінюються у часі та просторі. Вона включає рівняння матеріального та теплового балансу, рівняння гідродинаміки в стаціонарному та нестаціонарному станах.

Система базових рівнянь математичної моделі:

1. Рівняння нерозривності потоку.
2. Рівняння дифузії у рухомому середовищі.
3. Рівняння руху в'язкої середовища (повітряного потоку) при ламінарному русі через нерухомий шар зерна

$$\begin{cases} \rho \left(\frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \frac{\partial \omega_y}{\partial y} + \frac{\partial \omega_z}{\partial z} \right) = 0 \\ D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) = \omega_x \frac{\partial C}{\partial x} + \omega_y \frac{\partial C}{\partial y} + \omega_z \frac{\partial C}{\partial z} \\ \rho \left(\frac{\partial \omega_x}{\partial \tau} + \omega_x \frac{\partial \omega_x}{\partial x} + \omega_y \frac{\partial \omega_x}{\partial y} + \omega_z \frac{\partial \omega_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \nabla^2 \omega_x \end{cases} \quad (2.19)$$

де ρ – середня густина повітряного потоку, кг/м³;

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекції середньої швидкості по координатах, м/с;

C – масова концентрація вологи, кг/кг;

D – коефіцієнт дифузії, м²/с;

μ – динамічний коефіцієнт в'язкості, м²/с.

Граничні умови:

$$-D \frac{\partial C}{\partial x} = \beta \cdot (C_f - C_0) \quad (2.20)$$

Для моделювання тепло- та масообміну використовуються диференціальні рівняння вологопереносу та кінетики змін вологості:

$$\frac{\partial W_c}{\partial \tau} = k(W_c - W_p) \quad (2.21)$$

де k – коефіцієнт сушіння, с⁻¹;

a_m – коефіцієнт масообміну, м/с;

W_c, W_p – відповідно поточна та рівноважна вологість матеріалу, кг/кг.

Кінетика сушіння капілярно-пористих тіл протікає у два періоди:

$$\begin{cases} U_1 = \frac{\partial W}{\partial \tau} \\ U_2 = -\frac{\partial W}{\partial \tau} = K(W - W_p) \end{cases} \quad (2.22)$$

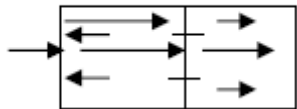
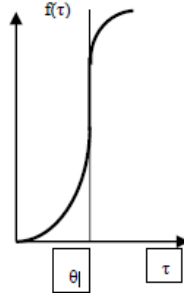
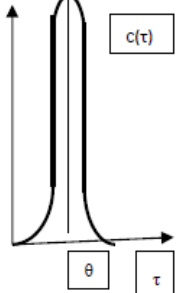
де W – вологість матеріалу, % мас.; W_p – рівноважна вологість, % мас.; K – коефіцієнт сушіння.

Для практичного моделювання процесу сушіння використовується система диференціальних рівнянь у частинних похідних з урахуванням тепло- та масообміну при русі повітряного потоку через зерновий шар. Критеріальні співвідношення для конвективного сушіння мають вигляд:

$$Nu_D = f(Re, Pr_D), \quad Nu = \alpha l / \lambda, \quad Eu = \Delta p / (\rho w^2)$$

де Nu_D, Nu – критерії Нуссельта для масо- та теплообміну; Re – критерій Рейнольдса; Pr_D – критерій Пекле; α – коефіцієнт теплообміну; λ – теплопровідність; Δp – надлишковий тиск у повітряному потоці, Па; w – середня швидкість повітря.

Таким чином, математична модель дозволяє описати процес сушіння нерухомого шару зерна з урахуванням одночасного тепло- та масообміну та руху повітряного потоку в установці, а також використовувати експериментальні дані для розрахунку критеріальних показників та інженерних параметрів процесу.

Назва моделі	Схема потоків	Математичний опис	Характер відгуку	
Однопараметрична дифузійна модель		$\frac{\partial C}{\partial \tau} = -w \frac{\partial C}{\partial x} + D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$	Ступінчасте збурення 	Імпульсне збурення 

Таким чином, визначено основні фактори, що впливають на ефективність очищення. Обрано ефективний спосіб очищення зерна від легких домішок у висхідному повітряному потоці та раціональну конструкцію пневмокамери для його реалізації.

Обрано ефективний спосіб активного вентилявання зерна у насипі та технологічне обладнання для його здійснення. Суть обраного способу активного вентилявання зерна та установки для його реалізації полягає в горизонтальному розподілі повітряного потоку за допомогою перфорованої центральної труби та відсмоктуванні відпрацьованого теплоносія за

допомогою спіралеподібної труби, встановленої по всій висоті бункера ближче до стінки ємності.

Даний спосіб активного вентилявання зерна та прийнята конструкція установки повністю виключають потребу у внутрішній додатковій перфорованій ємності, а також у стержнях для перемішування зерна під час активного вентилявання. Запропонована конструкція зменшує капітальні витрати на виготовлення елеваторних силосів та бункерів для активного вентилявання зерна.

Основні переваги запропонованої установки:

1. Рівномірний розподіл повітряного потоку при активному вентиляванні зерна або при сушінні шляхом активного вентилявання за допомогою центральної газорозподільної труби з сітчастою поверхнею;

2. Відведення відпрацьованого повітря разом із випарованою вологою за допомогою спіралі;

3. Можливість вентилювати всю зернову масу, а також лише осередки самонагрівання завдяки обраній конструкції двох поршнів і лебідки;

4. При продуванні лише осередків самонагрівання можна значно зменшити обсяг поданого повітря. Це досягається використанням телескопічної труби, верхня частина якої кріпиться до нижньої частини нижнього поршня, а нижня частина приєднана до магістральної труби для подачі нагрітого або атмосферного повітря до центральної газорозподільної циліндричної труби. Телескопічна труба подає повітря через нижній поршень у зону продування, при цьому інші шари зерна по висоті силосу не вентилюються. Повітря до інших зон зернової маси не потрапляє завдяки використанню телескопічної труби.

3 ОБГРУНТУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ ПРОЦЕСІВ ОЧИСТКИ ЗЕРНА ВІД ЛЕГКИХ ДОМІШОК У ПОТОЦІ ТА СУШІННЯ ЗЕРНА СПОСОБОМ АКТИВНОГО ВЕНТИЛЮВАННЯ

3.1 Методика проведення експериментального дослідження процесу поточної очистки зерна від легких домішок

Дослідження процесу очищення зерна від легких домішок та пилу проводили на експериментальній установці (рис. 3.1).

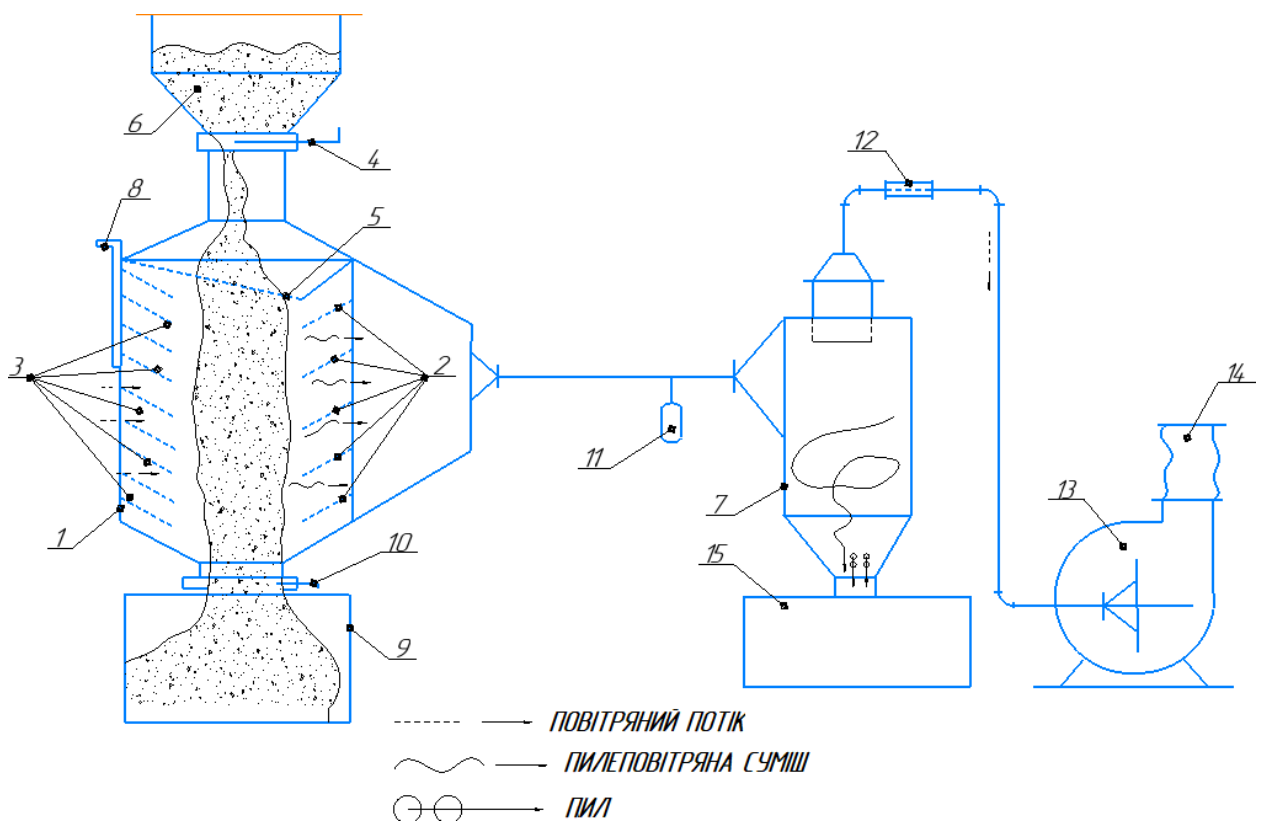


Рисунок 3.1 - Схема експериментальної установки

1 – корпус; 2,3 – перфоровані жалюзі для виведення аеросуміші (2) та подачі повітряного потоку (3); 4 – заслінка для подачі зерна; 5 – розпушувальна решітка; 6 – приймальний бункер; 7 – циклон-пилівідокремлювач; 8 – заслінка для регулювання висоти камери; 9 – бункер очищеного зерна; 10 – вантажний клапан; 11 – анемометр; 12 – заслінка для регулювання швидкості повітря; 13 – вентилятор; 14 – рукавний фільтр; 15 – бункер для збору пилу; 16 – заслінка бункера.

Установка складається з: корпусу 1; перфорованих жалюзей для подачі повітря 3 та виведення аеросуміші 2; заслінки для регулювання та

встановлення товщини поданого зерна 4; похилої решітки для розпушення зерна 5; приймального бункера для вихідного зерна 6; циклону для відокремлення пилу від повітря 7; заслінки для регулювання та встановлення висоти камери 8; бункера для очищеного зерна 9; вантажного клапана 10; анемометра testo 416 (серійний номер 03621531, Німеччина, діапазон вимірювання 0,6–40 м/с) 11; заслінки для регулювання швидкості повітря 12; вентилятора 13; рукавного фільтра 14; бункера для збору пилу 15; заслінки бункера 16.

Робоча довжина всмоктуючих жалюзних патрубків 3 регулюється зміною висоти заслінки 8. Товщина шару поданого зерна встановлюється заслінкою 4, розташованою під бункером 6.

Згідно з матрицею планування, попередньо підготовлене зерно з бункера 6 надходить на розпушувальну решітку 5. Проходячи через решітку, розпушений шар зерна під дією сили тяжіння потрапляє у робочу зону, утворену між перфорованими жалюзями 2 і 3. У робочій зоні розпушений шар зерна піддається впливу повітряного потоку, який засмоктується вентилятором 13.

Повітря через жалюзні решітки 3 пронизує міжзерновий простір, захоплюючи з собою легкі домішки, і далі виводиться через жалюзний патрубок 2 в атмосферу. Легкі домішки потрапляють у циклон-відокремлювач 7, а повітря спрямовується до вентилятора 13. Дрібнодисперсні частки та пил, що уносяться повітрям, затримуються рукавним фільтром 14, встановленим на вихідному патрубку вентилятора 13.

Зерно, очищене від легких домішок, під дією сили тяжіння спрямовується до приймального бункера 9. Перфорація кожного клиноподібного жалюзі для подачі повітря та виведення аеросуміші залежно від розмірів отворів забезпечує рівномірний розподіл повітряного потоку у міжзерновому просторі робочої зони камери.

Максимальне видалення легких домішок у пристрої забезпечується при $v_{\phi} = 2,5$ м/с, часі продування $\tau = 30$ с та висоті шару зерна в циліндрі $H = 40$

мм. Прийнята швидкість фільтрації повітря (2,5 м/с) забезпечується положенням заслінки 3, встановленої у вихідних отворах вентилятора.

Для вимірювання швидкості всмоктування повітря використовували анемометр testo 416 (Німеччина) з діапазоном вимірювання 0,6–40 м/с та мікроманометр ММН (рисунок 3.2).



Рисунок 3.2 – Фото приладів

Для отримання однорідної маси пшеницю загальною масою 320 кг, призначену для очищення, перемішували у спеціальному гвинтовому змішувачі. Із загальної маси зерна в п'яти різних місцях за допомогою спеціального пробовідбірника відбирали проби загальною масою не менше ніж 5 кг.

Відібрану кількість зерна з проби поміщали в циліндр пристрою (рис. 3.2) так, щоб висота шару не перевищувала 40 мм, після чого здійснювали продування через пористу перегородку вентилятором протягом 30 с. Потім за приростом маси фільтра визначали кількість пилу, видалену з проби зерна. Під час кожного продування суворо враховували масу проби. Для розрахунків приймали середні значення маси виділених легких домішок після кожного продування проби зерна.

Вміст легких домішок у вихідній зерновій суміші визначали за формулою:

$$m = \frac{m_{\text{п}} m_{\text{пр}}}{M_3}, \quad (3.1)$$

де

$m_{\text{п}}$ – маса пилу, виділеного з проби зерна, г; $m_{\text{пр}}$ – маса проби зерна у вертикальному циліндрі, г; M_3 – маса вихідної зернової суміші, г.

Ефективність очищення зерна визначали таким чином: усі відходи з пиловідокремлювача просіювали через сито з розміром отворів 250 мкм, а за різницею маси рукавного фільтра до та після експерименту визначали загальну кількість уловлених домішок.

Ступінь уловлювання легких домішок і пилу обчислювали за співвідношенням маси пилу, уловленої пиловідокремлювачем і рукавним фільтром (m_1), до маси пилу у вихідній суміші (m) за формулою:

$$y = \frac{m_1}{m} \cdot 100\%, \quad (3.2)$$

Як математичний апарат у дослідженні використовуються математико-статистичні методи, зокрема отримані системи рівнянь регресії, які моделюють взаємозв'язки між основним критерієм оптимальності та іншими параметрами процесу.

На головний критерій процесу очищення зерна від пилу та легких домішок - коефіцієнт очищення (y) - впливають такі фактори: товщина шару зерна, що надходить (h , мм); швидкість всмоктування повітря (v , м/с) та висота пневмосепарувальної камери (H , мм). Зазначені фактори визначають конкретні виробничі умови проведення процесу. Тому доцільно здійснювати коригування системи рівнянь регресії відповідно до впливу цих факторів. (табл.3.1)

Таблиця 3.1

Фактори та рівні варіювання

Фактори	Рівні варіювання	Інтервали варіювання
		-1,68
Товщина початкового шару зерна, мм (δ_1)	23,18	30
Швидкість всмоктування повітря, м/с (v)	2,159	2,5
Висота пневмосепарувальної камери, мм (H)	430	500

Тоді рівняння регресії процесу очищення зерна від легких домішок, що має найвищий коефіцієнт ефективності y , має вигляд:

$$y = 0,841383494 + -0,0301x_1 + 0,07566x_2 + 0,02424x_3 + 0,0025x_1x_2 + 0,0025x_3 - 0,0025x_2x_3 - 0,03786x_1^2 - 0,02375x_2^2 - 0,02022x_3^2 \quad (3.3)$$

Таким чином, оптимальні параметри процесу очищення зерна від домішок досягаються в точці, де:

- початкова товщина шару зерна становить 40 мм,
- висота пневмосепарувальної камери 600 мм,
- швидкість подачі повітря 3,841 м/с.

У цій точці коефіцієнт ефективності очищення становить 0,95.

Розрахункове значення критерію Фішера: $F_p = 4,9136$

Табличне значення критерію Фішера при ступенях свободи $f_1 = 5$ та $f_2 = 5$ становить $F_t = 5,05$

$$y_u = -0,8005 + 0,6312 * x + 0,0258 * y - 0,0833 * x * x + 0,0005 * x * y - 0,0004 * y * y$$

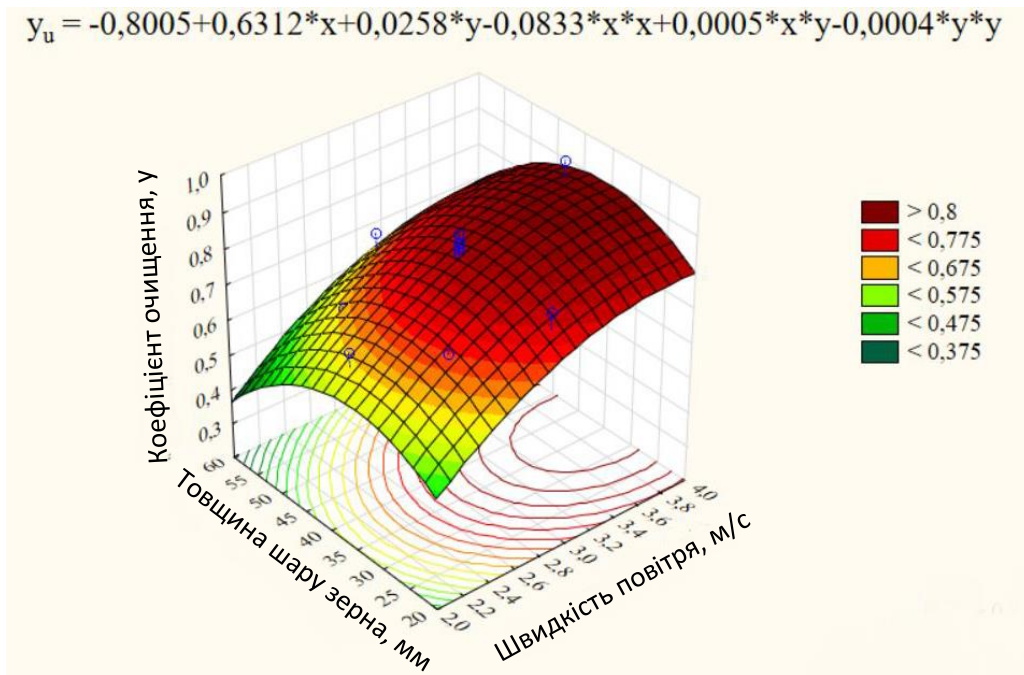


Рисунок 3.3 – Залежність коефіцієнта очищення $y, \%$ від початкової товщини шару зерна $\delta_1, \text{мм}$ та швидкості повітря $v, \text{м/с}$

$$y_u = -0,3525 + 0,0255 * x + 0,0022 * y - 0,0004 * x * x + 2,5E-6 * x * y - 1,7025E-6 * y * y$$

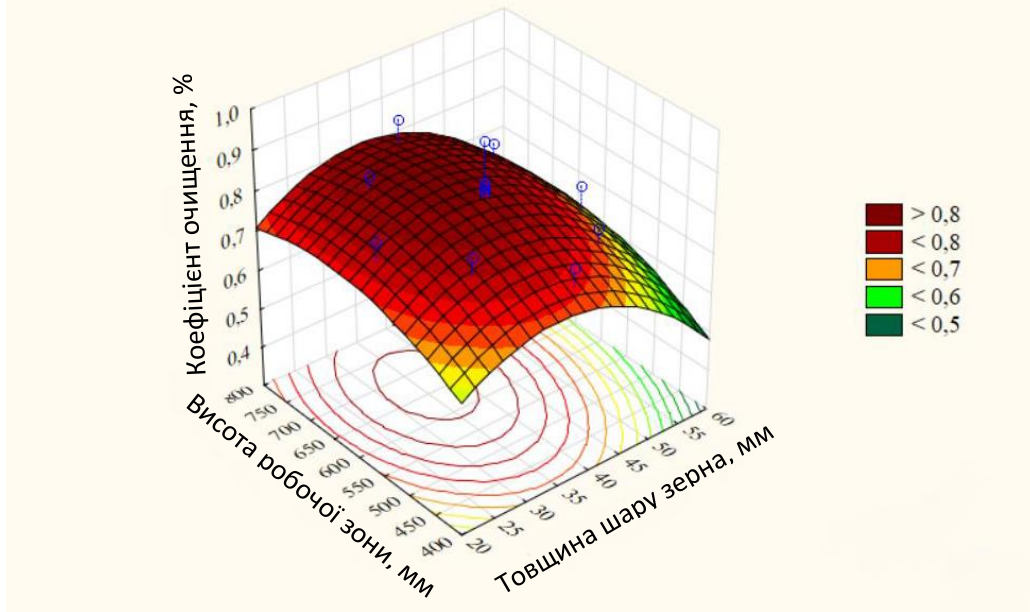


Рисунок 3.4 – Залежність коефіцієнта очищення y_u ,% від початкової товщини шару зерна δ_1 ,мм та висоти робочої зони H ,мм

$$y_u = -1,1533 + 0,6473 * x + 0,0023 * y - 0,0776 * x * x - 5E-5 * x * y - 1,5964E-6 * y * y$$

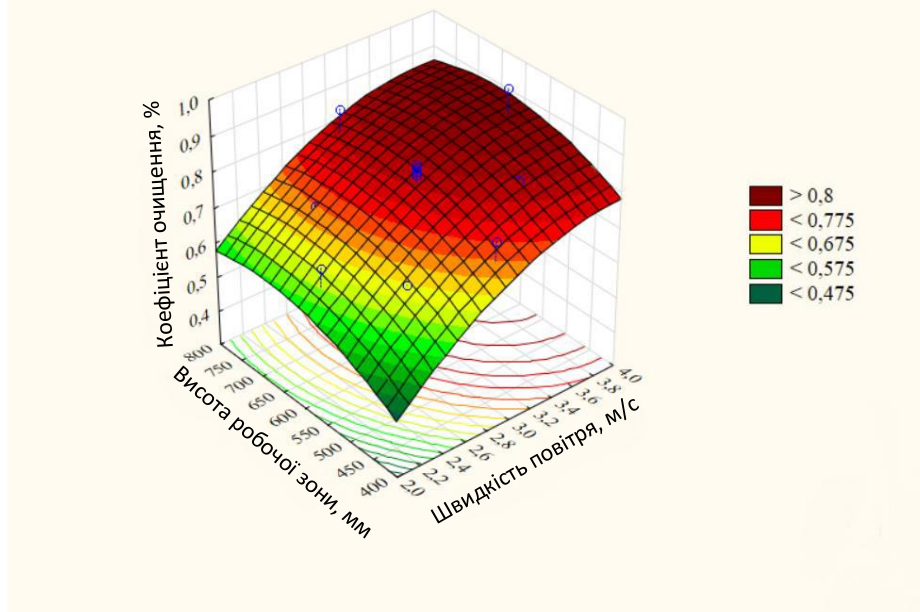


Рисунок 3.5 – Залежність коефіцієнта очищення y_u ,% від швидкості повітря v ,м/с та висоти робочої зони H ,мм

Як видно з графічних залежностей, коефіцієнт ефективності очищення зерна від легких домішок зменшується зі зниженням швидкості повітря. Разом з тим, при збільшенні швидкості повітря та підвищенні початкової товщини

шару зернової маси до 40 мм коефіцієнт ефективності також спостерігає певне зниження.

Максимальний коефіцієнт ефективності досягається при початковій товщині шару зерна 40 мм та швидкості повітря 3,841 м/с і становить 0,95.

3.2 Методика проведення експериментального дослідження процесу сушки активним вентиляванням

Експериментальне дослідження процесу сушіння зерна пшениці активним вентиляванням при змінній подачі тепла проводили на експериментальній установці (рис. 3.6), що складається з вертикальної циліндричної камери 1, кришки 2, циклон-очисника 3, всмоктуючого 4 та нагнітаючого 5 вентиляторів.

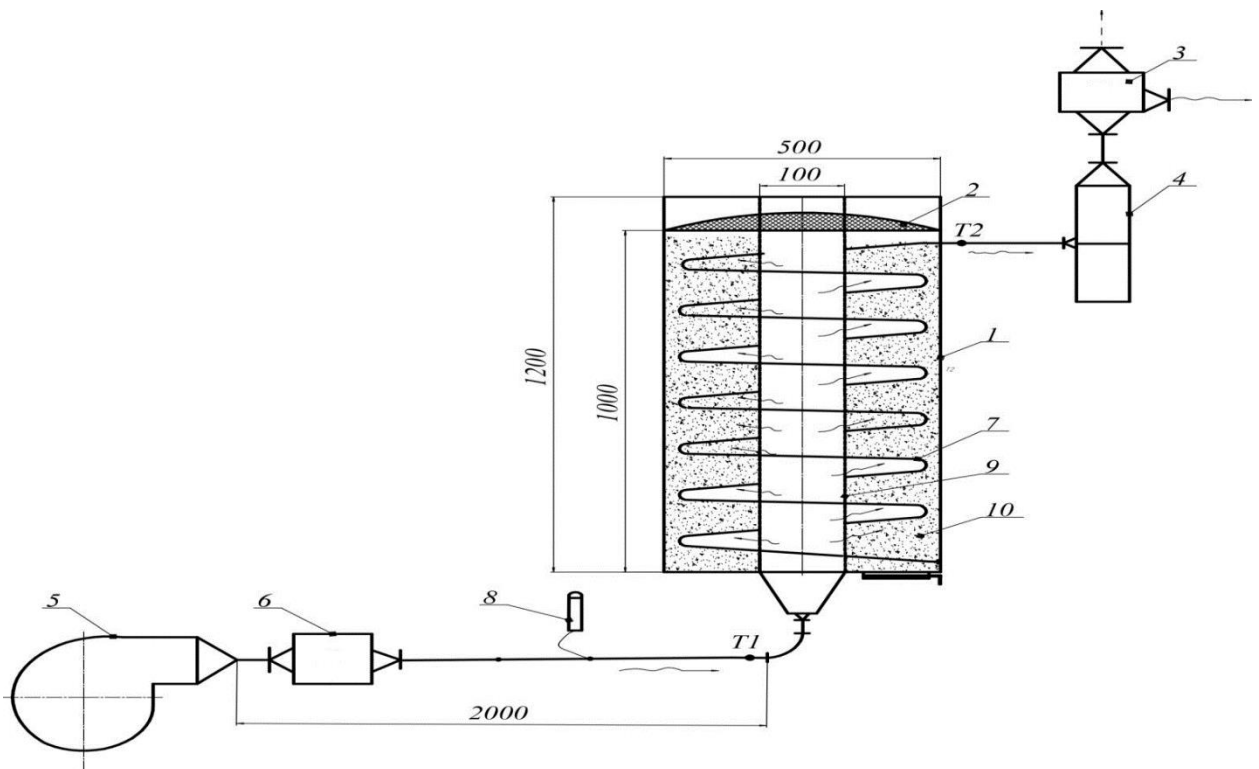


Рисунок 3.6 - Експериментальна установка для активного вентилявання зерна при змінній подачі тепла

1 – корпус камери; 2 – кришка; 3 – конденсатор; 4,5 – всмоктуючий (4) та нагнітаючий (5) вентилятори; 6 – електрокалорифер; 7 – спіралеподібна

сітчаста трубка; 8 – портативний анемометр; 9 – перфорована газорозподільна труба; 10 – зернова культура

Експериментальна сушильна камера призначена для активного вентилявання зерна пшениці при змінній подачі тепла. Повітря, нагріте в електрокалорифері, подається нагнітаючим вентилятором через перфоровану газорозподільну трубу, де воно рівномірно розподіляється у міжзерновому просторі. Такий спосіб подачі повітря забезпечує рівномірний контакт теплоносія з усім обсягом зерна, що сприяє більш ефективному видаленню вологи.

Відпрацьоване повітря видаляється через спіралеподібну всмоктуючу трубу, встановлену по всій висоті камери, що дозволяє підтримувати постійний повітряний потік і уникати застою вологи у верхніх або нижніх шарах зерна. Завдяки винтовому розташуванню труби та її сітчастій конструкції повітря всмоктується рівномірно по всій висоті шару зерна.

Таким чином, поєднання перфорованої газорозподільної труби для подачі гарячого повітря та спіралеподібної всмоктуючої труби для видалення відпрацьованого повітря забезпечує ефективне та рівномірне сушіння зерна при мінімальних теплових і енергетичних витратах.



Рисунок 3.7 - Газорозподільна та спіралеподібна труба

Відпрацьований теплоносій, що виходить із шару зерна, надходить у спіралеподібну сітчасту трубу 7, встановлену по всій висоті сушильної камери. Крок спіралі був обраний у чотири рази меншим за висоту продуваної зони,

що забезпечує рівномірне видалення відпрацьованого повітря та оптимізацію гідродинамічних умов у шарі зерна. Розмір отворів труби (2×15 мм) і їх розташування через кожні 5 см запобігають потраплянню зерен у систему відсмоктування.

Контроль температури повітряного потоку здійснюється у двох точках: після калорифера (Т1) та у всмоктуючому повітропроводі (Т2). Регулювання температури проводиться терморегулятором, встановленим після калорифера.

Швидкість повітряного потоку вимірюється анемометром testo 416, а температура та вологість відпрацьованого повітря контролюються гігро-термометром UT332 у точці Т2, що дозволяє вести поточний контроль параметрів повітря під час експерименту.

Поєднання спіралеподібної труби для видалення відпрацьованого теплоносія та системи вимірювання температури, вологості й швидкості повітря забезпечує ефективне та рівномірне сушіння зерна з мінімальними тепловими втратами та точним контролем режимів процесу.

На рисунку 3.8 показано фотографію експериментальної установки для активного вентиляювання зерна.



Рисунок 3.14 – Фотографія експериментальної установки для активного вентиляювання зерна

1 – нагнітаючий вентилятор; 2 – калорифер; 3 – магістральний трубопровід; 4 – анемометр testo 416; 5 – корпус; 6 – всмоктуючий вентилятор; 7 – всмоктуюча спіраль; 8 – центральна перфорована газорозподільна труба; 9 – мановакуумметр для вимірювання величини розрідження

Досліди проводилися з зерном озимої пшениці. Вологість зерна, що надходить з полів на зберігання в елеватори, зазвичай коливається від 13–14 % до 17–18 %, тому в експериментах використовували зерно з цим діапазоном вологості.

Вологість висушеного зерна визначали методом сушіння проб у сушильному шафі до постійної маси при температурі 403 К протягом 40 хв.

В якості основних факторів були обрані:

- X_1 – швидкість повітря v_v (м/с) на вході в міжзерновий простір;
- X_2 – температура повітря, °С;
- X_3 – відстань (висота продуваної зони), м.

Обрані фактори сумісні та некорельовані між собою.

У таблиці 3.2 наведені основні характеристики плану експерименту. Загальна кількість дослідів $N=18$, кількість дослідів у центрі плану $N_0=6$, кількість факторів $k=3$, плече «зіркової» точки $r=1,682$.

В якості функції відгуку обрано Y_1 – удельні енерговитрати, кДж/кг.

Таблиця 3.2

Основні характеристики плану експеримента

Умови планування	X_1	X_2	X_3
Нульовий рівень (0)	1,0	75	0,9
Інтервал варіювання	0,476	11,89	0,357
Верхній рівень (+1)	1,238	80,945	1,078
Нижній рівень (-1)	0,762	69,055	0,721
Верхня «зіркова» точка (+1,682)	1,4	85	1,2
Нижня «зіркова» точка (-1,682)	0,6	65	0,6

Для обробки експериментальних даних використовували програмний комплекс STATISTICA 10. Для отримання рівняння регресії матричні дані оброблялися за допомогою програмного комплексу SGWIN.

Рівняння регресії в фізичних змінних після видалення незначущих коефіцієнтів має вигляд:

$$Y_1 = 2498,58 - 69,0472 \cdot X_1 - 53,0884 \cdot X_2 - 416,28 \cdot X_3 + 363,488 \cdot X_1^2 - 6,64353 \cdot X_1^2 \cdot X_2 - 262,3 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,365153 \cdot X_2^2 + 3,29849 \cdot X_2 \cdot X_3 + 213,386 \cdot X_3^2$$

$$E = 2644,196 - 630,534 \cdot H_{\text{шару}} - 55,897 \cdot T + 208,305 \cdot H_{\text{шару}}^2 + 2,783 \cdot H_{\text{шару}} \cdot T + 0,342 \cdot T^2$$

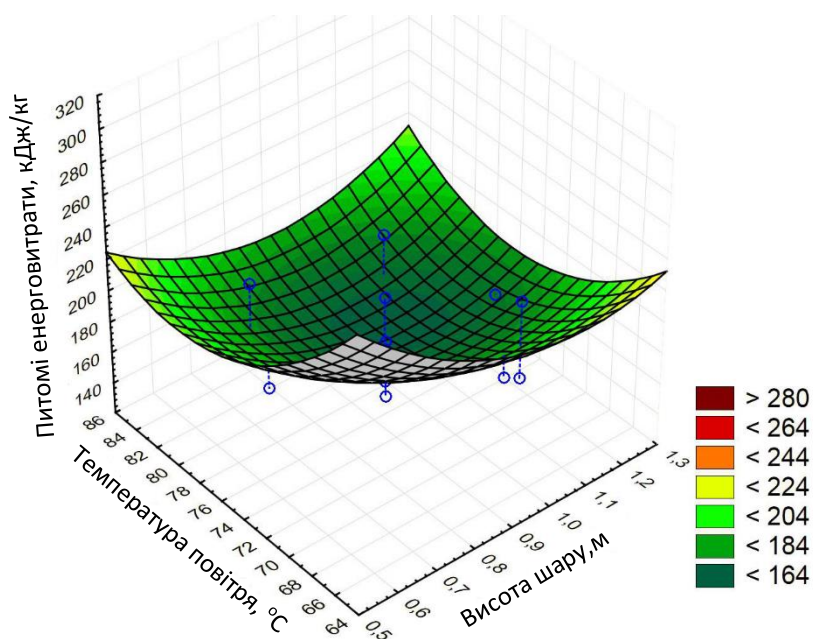
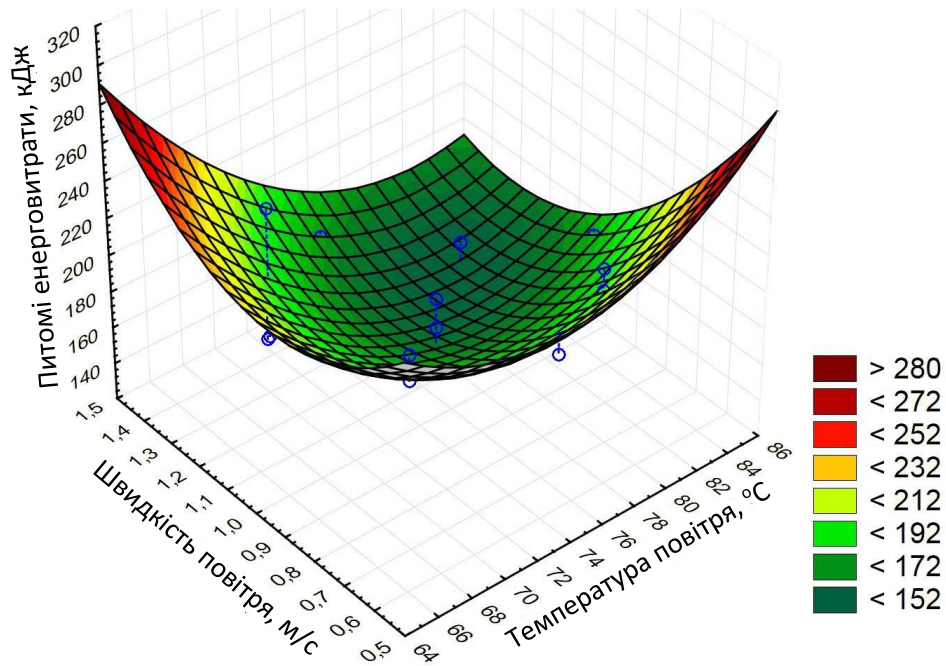


Рисунок 3.15 – Залежність питомих енергетичних витрат (E, кДж/кг) від висоти продуваного шару зерна (H шару, м) та температури повітря (T, °C).

$$E = 2109,231 - 50,021 \cdot T + 61,348 \cdot v_B + 0,365 \cdot T^2 - 6,803 \cdot T \cdot v_B + 199,447 \cdot v_B^2$$



Рисунгк 3.16 - Поверхня відгуку питомих енергетичних витрат залежно від швидкості повітря v_v (м/с) та висоти продуваного шару зерна $H_{\text{шару}}$ (м)

Завдання оптимізації процесу активного вентилявання зерна полягало у пошуку таких умов, при яких удельні енерговитрати були мінімальними, за збалансованого співвідношення швидкості та температури повітря та висоти продуваного шару зерна (рисунки 3.15–3.17).

$$W_k = 39,6191 - 11,2107 \cdot H_{\text{шару}} - 0,5934 \cdot T + 6,8307 \cdot H_{\text{шару}}^2 + 0,0002 \cdot H_{\text{шару}} \cdot T + 0,0036 \cdot T^2$$

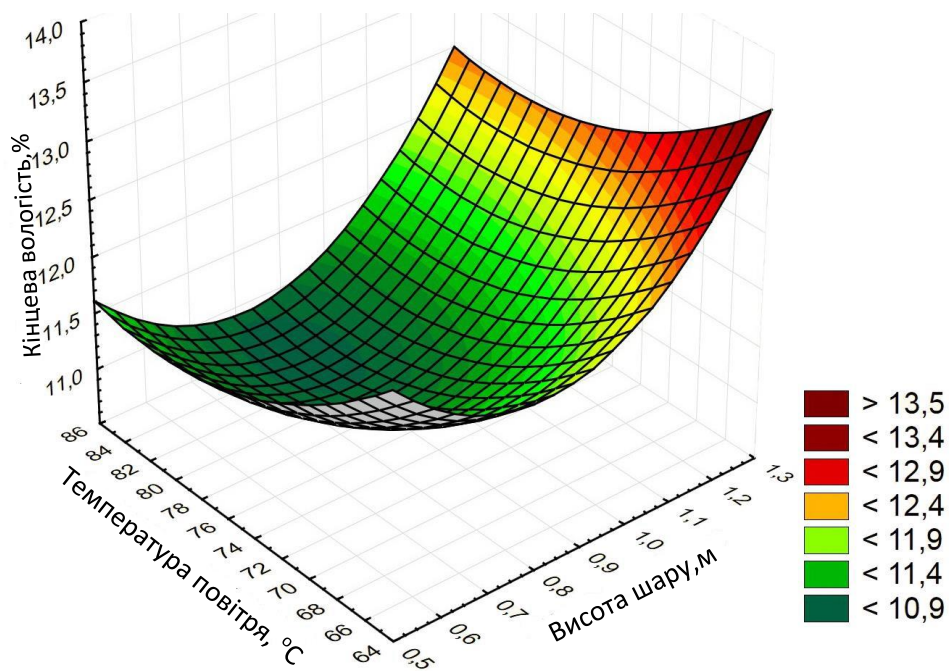


Рисунок 3.17 - Поверхня відгуку кінцевої вологості W_k залежно від температури T та висоти продуваного шару зерна $H_{\text{шару}}$
 $W_k = 22,1649 + 7,1244 \cdot v_B - 0,3474 \cdot T + 0,0586 \cdot v_B^2 \cdot T - 0,0883 \cdot v_B \cdot T + 0,0026 \cdot T^2$

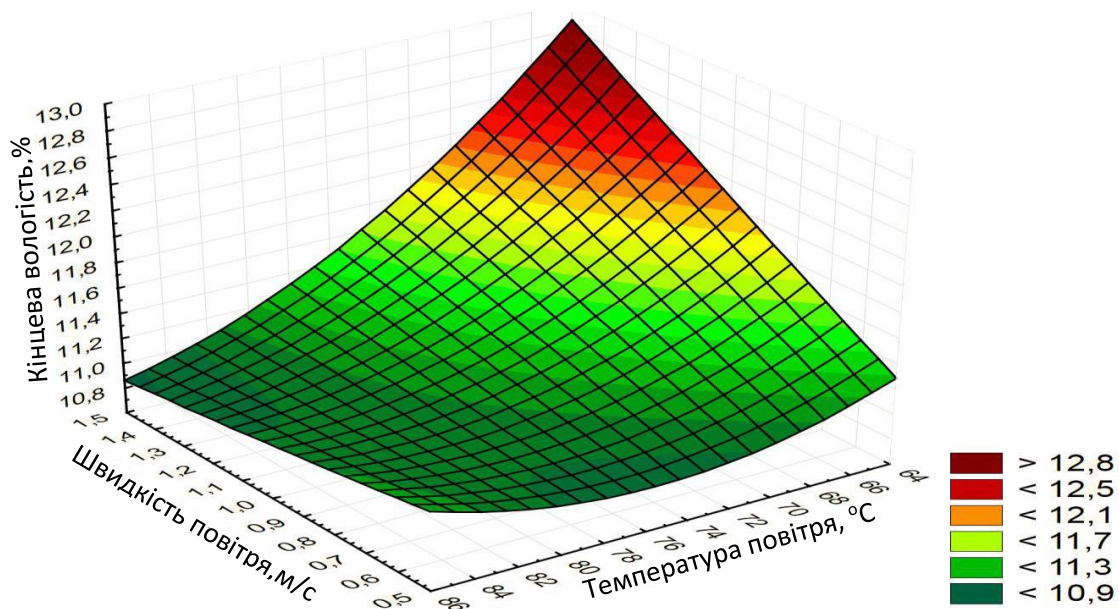


Рисунок 3.18 - Поверхня відгуку кінцевої вологості W_k залежно від температури T та швидкості повітря v_B .

Завдання оптимізації процесу активного вентилявання зерна в ємності полягало у пошуку таких умов, за яких питомі енергетичні витрати були б

мінімальними при збалансованому співвідношенні швидкості повітря та висоти продуваної зони.

Оптимальними параметрами вважаються: висота продуваної зони — 1 м, при якій швидкість повітря складає 1,2 м/с. Для досягнення мінімальних питомих енергетичних витрат температура повітря повинна становити близько 80 °С.

З огляду на наявні обмеження по температурі, оптимальна висота камери становить близько 75 % від максимальних 1,2 м, тобто 0,9–1 м. Таким чином, припущення про раціональність висоти продуваної камери в 1 метр підтверджується.

Висновки

1. Отримано регресійні рівняння та побудовано графіки залежності коефіцієнта очищення від: товщини шару зерна та швидкості повітря; товщини шару та робочої висоти камери; швидкості повітря та робочої висоти камери.

2. За результатами експериментальних досліджень оптимальний коефіцієнт ефективності очищення 0,95 досягається при товщині шару зерна 40 мм та швидкості повітря 3,8 м/с.

3. Розроблено експериментальну установку та методику визначення гідравлічного опору пневмокамери для очищення зерна від легких домішок, який становить близько 18 Па.

4. Встановлено залежності питомих енергетичних витрат від висоти шару зерна, температури та швидкості повітря; побудовані поверхні відгуку, що дозволяють визначати оптимальні параметри процесу.

5. Розроблені регресійні залежності дозволяють прогнозувати кінцеву вологість зерна залежно від висоти шару, температури та швидкості повітря; коефіцієнт достовірності для рівнянь W_k складає 71,75 %.

6. Побудована узагальнена функція бажаності D , мінімальне значення якої (0,011) досягається при висоті продуваної зони 1 м, швидкості повітря 1,2 м/с

та температурі близько 80 °С, що підтверджує оптимальність обраних параметрів процесу.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ЗАХИСТ НАВКООШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

4.1 Загальні вимоги при експлуатації обладнання для активного вентиляювання та очищення зерна

При експлуатації обладнання для активного вентиляювання та очищення зерна необхідно суворо дотримуватися правил охорони праці, оскільки технологічний процес пов'язаний з високими температурами, рухомими механізмами та утворенням пилу. До роботи допускаються лише працівники, які пройшли первинний і повторний інструктаж, мають відповідну професійну кваліфікацію, медичний допуск і ознайомлені з технологічним процесом та правилами безпечної експлуатації пневмокамер, вентиляторів, нагрівальних елементів та механізмів подачі зерна. Перед початком роботи обов'язково проводиться перевірка справності обладнання: герметичності пневмокамери, працездатності вентиляторів, нагрівачів, трубопроводів, датчиків температури та механізмів регулювання повітряного потоку. Робота з несправним обладнанням або без захисних огорожень рухомих частин заборонена.

Під час активного вентиляювання та сушіння зерна температура повітря може досягати 80 °С, тому працівникам забороняється контактувати з гарячими поверхнями та потоком повітря. Не допускається перевищення максимально допустимої швидкості повітря та товщини шару зерна, оскільки це може призвести до аварійних режимів роботи установки або пошкодження пневмокамери. Для обслуговування установки живлення необхідно відключати, а на робочій зоні встановлювати попереджувальні знаки «Не вмикати – працюють люди».

Важливе значення має захист працівників від пилу та домішок, що утворюються під час очищення зерна. Працівники повинні використовувати засоби індивідуального захисту: респіратори, захисні окуляри, рукавички та спецодяг. Для зменшення концентрації пилу та легких домішок у приміщенні встановлюється система витяжної вентиляції, пиловловлювачі та колективні засоби захисту, такі як огороження рухомих механізмів, сигнальні знаки та аварійні зупинки.

Електробезпека є критично важливим аспектом роботи установки. Всі електроприлади повинні бути справними, заземленими та підключеними через автоматичні вимикачі. Забороняється самотійно ремонтувати електрообладнання під час роботи установки. У разі перегріву або появи запаху горілого необхідно негайно відключити живлення та повідомити відповідальну особу. Регулярно перевіряється стан кабелів, контактів та ізоляції електроприладів, а також робота захисних реле та автоматів.

Високі температури повітря та можливе нагрівання зерна створюють ризик займання пилу, тому приміщення обладнується вогнегасниками, системою пожежної сигналізації та попереджувальними знаками. Забороняється зберігати легкозаймисті матеріали поблизу установки. Працівники повинні знати порядок дій у разі виникнення пожежі або аварійних ситуацій, а також мати навички користування первинними засобами пожежогасіння.

Для забезпечення безпечної експлуатації застосовуються організаційні та технологічні заходи. Використовують лише справне обладнання, дотримуються режимних параметрів процесу, проводиться регулярний контроль стану вентиляторів, нагрівачів, пневмокамер та трубопроводів. Періодично здійснюється очищення системи від пилу та легких домішок для запобігання загорянню та поломок механізмів. Працівники проходять навчання щодо безпечного обслуговування обладнання та дій у разі аварійних ситуацій. Щодня контролюються параметри роботи установки, зокрема температура, швидкість повітря та стан шару зерна. Усі аварійні та позаштатні ситуації фіксуються, аналізуються та розробляються заходи щодо їх запобігання.

Особливу увагу слід приділити потенційним аварійним ситуаціям. До них відносяться: перевантаження пневмокамери через надмірну товщину шару зерна, що може призвести до блокування вентиляторів; перегрів нагрівального елемента, що підвищує ризик займання пилу; витік повітря або пошкодження трубопроводів, що знижує ефективність процесу та може

створити небезпечні умови для працівників; неправильна робота автоматичних систем регулювання температури та швидкості повітря, що може спричинити нестабільні режими сушіння. Для запобігання цим аваріям передбачено контрольні датчики, автоматичні блокування, сигналізацію та регулярні технічні огляди.

Висока температура повітря та пил у приміщенні потребують організації спеціальних зон доступу та позначення небезпечних ділянок, де можлива термічна травма або подразнення дихальних шляхів. Для мінімізації ризику травмування передбачено створення огорожень навколо рухомих механізмів, застосування аварійних зупинок та дотримання правил взаємодії між працівниками під час обслуговування установки.

Дотримання всіх зазначених заходів охорони праці забезпечує безпечну експлуатацію установки для активного вентилявання та очищення зерна, знижує ризик травматизму, загоряння та аварійного пошкодження обладнання, а також підвищує ефективність технологічного процесу та зберігає якість зерна.

4.2 Захист навколишнього середовища при експлуатації обладнання для активного вентилявання та очищення зерна

Експлуатація обладнання для активного вентилявання та очищення зерна потребує врахування впливу технологічного процесу на навколишнє середовище та дотримання екологічних норм. Основними джерелами потенційного негативного впливу є утворення пилу, виділення тепла, використання електроенергії та можливе забруднення зерна домішками.

Пил, що утворюється під час очищення та переміщення зерна, може негативно впливати на атмосферне повітря та здоров'я працівників. Для зменшення викидів пилу застосовується обладнання з витяжною вентиляцією, пиловловлювачі та системи очищення повітря. Забезпечується герметичність

пневмокамер та трубопроводів, що запобігає розповсюдженню пилу у виробничому приміщенні та назовні.

В процесі активного вентилявання виділяється тепло, яке може впливати на мікроклімат приміщення. Для його регулювання використовуються теплоізоляційні матеріали, системи вентиляції та відведення відпрацьованого повітря. Це дозволяє зменшити енергетичні втрати та уникнути перегріву повітряного середовища.

Особливу увагу приділяють раціональному використанню енергоресурсів. Використання ефективних вентиляторів, правильне регулювання швидкості повітря та температури дозволяє мінімізувати споживання електроенергії, що сприяє зменшенню викидів парникових газів при генерації електроенергії.

Для попередження забруднення ґрунту та водних об'єктів залишки домішок та пилу, що утворюються під час очищення зерна, збираються в спеціальні резервуари або направляються на повторну переробку. Застосування таких заходів дозволяє забезпечити утилізацію відходів без негативного впливу на навколишнє середовище.

Регулярний контроль стану обладнання та технологічного процесу, дотримання правил експлуатації та своєчасне технічне обслуговування дозволяє зменшити екологічні ризики та підвищити безпеку виробництва. Організаційні заходи включають навчання персоналу щодо екологічних вимог, правильного поводження з відходами та дотримання норм охорони навколишнього середовища.

Таким чином, дотримання комплексу технічних, організаційних та технологічних заходів дозволяє мінімізувати негативний вплив процесу активного вентилявання та очищення зерна на навколишнє середовище, забезпечує безпеку працівників та сприяє підвищенню екологічної ефективності виробництва.

Висновки

1. Для безпечної експлуатації обладнання для активного вентилявання та очищення зерна необхідно дотримуватися правил охорони праці, використовувати засоби індивідуального та колективного захисту, контролювати параметри процесу та технічний стан обладнання.

2. Потенційні аварійні ситуації, такі як перегрів нагрівальних елементів, перевантаження пневмокамери, витік повітря або неправильна робота автоматичних систем, можна запобігти завдяки автоматичним блокуванням, сигналізації та регулярним технічним оглядам.

3. Захист навколишнього середовища забезпечується зменшенням викидів пилу, ефективним відведенням відпрацьованого повітря, раціональним використанням енергоресурсів та збором та утилізацією відходів.

4. Дотримання цих заходів сприяє підвищенню безпеки працівників, ефективності технологічного процесу та збереженню якості зерна, а також мінімізує негативний вплив на навколишнє середовище.

5 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗРАХУНОК СИСТЕМИ ОЧИЩЕННЯ ТА АКТИВНОГО ВЕНТИЛЮВАННЯ ЗЕРНА

Вихідні дані для розрахунку:

Продуктивність установки – 10 т/год очищення та вентиляції зерна;

Висота продуваного шару – 1 м;

Швидкість повітря – 1,2 м/с;

Температура повітря – 80 °С;

Тривалість експлуатації – 300 робочих днів на рік;

Вартість обладнання: пневмокамера – 120 000 грн, вентилятор – 30 000 грн,
нагрівачі та автоматика – 50 000 грн;

Вартість електроенергії – 5 грн/кВт·год.

Капітальні витрати включають вартість обладнання та монтажні роботи:

$$C_{\text{кап}} = C_{\text{пневмокамери}} + C_{\text{вентилятора}} + C_{\text{нагр}} + C_{\text{монт}} \quad (5.1)$$

Прийmemo монтажні роботи приблизно 15% від вартості обладнання:

$$C_{\text{монт}} = 0,15 \cdot (120000 + 30000 + 50000) = 30000 \text{ грн} \quad (5.2)$$

Тоді:

$$C_{\text{кап}} = 120000 + 30000 + 50000 + 30000 = 230000 \text{ грн} \quad (5.3)$$

Експлуатаційні витрати включають електроенергію, обслуговування та заробітну плату персоналу:

1. Електроенергія:

Потужність вентилятора та нагрівачів: $P=50$ кВт

Час роботи на рік: $t=10$ т/год·300 днів·8 год/день=2400 год

$$C_{\text{ел}} = P \cdot t \cdot B_{\text{ел}} = 50 \cdot 2400 \cdot 5 = 600000 \text{ грн / рік} \quad (5.4)$$

2. Обслуговування та зарплата персоналу

Два оператори по 10 000 грн/міс: $2 \cdot 10\,000 \cdot 12 = 240\,000$ грн/рік

Ремонт та технічне обслуговування – 5% від капітальних витрат:

$$0,05 \cdot 230\,000 = 11\,500 \text{ грн/рік}$$

Сумарні експлуатаційні витрати

$$C_{експл} = 600000 + 240000 + 11500 \approx 851500 \text{ грн / рік} \quad (5.5)$$

За рахунок впровадження системи активного вентилявання та очищення зерна досягаються наступні економічні вигоди:

1. Зменшення втрат зерна під час зберігання на 2% від загального обсягу;
2. Підвищення якості зерна, що дозволяє отримати додатковий прибуток від продажу, наприклад, 10 000 грн на тонну зерна;
3. Скорочення витрат на ручне сортування та просіювання зерна.

При продуктивності 10 т/год, 2400 год/рік:

$$M_{зерна} = 10 \cdot 2400 = 24000 \text{ т / рік} \quad (5.6)$$

Зменшення втрат 2%:

$$24000 \cdot 0,02 = 480 \text{ т/рік}$$

Прибуток від збереженого зерна (вартість 10 000 грн/т):

$$E = 480 \cdot 10000 = 4800000 \text{ грн/рік}$$

Сумарні капітальні та експлуатаційні витрати на рік:

$$C_{загал} = C_{кап} + C_{експл} = 230000 + 851500 = 1081500 \text{ грн / рік} \quad (5.7)$$

Термін окупності системи:

$$T_{окупн} = E - C_{експл} / C_{кап} = 4800000 - 851500 / 230000 \approx 0,055 \text{ року} \approx 20 \text{ днів} \quad (5.8)$$

Результати розрахунку наведені в таблиці 5.1:

Показник	Базове обладнання	Система очищення та активного вентилявання	Примітка
Продуктивність установки	10 т/год	10 т/год	Продуктивність однакова
Річний обсяг обробки зерна	24 000 т	24 000 т	—
Капітальні витрати	150 000 грн	230 000 грн	Вища в новій системі через пневмокамеру та автоматику

Експлуатаційні витрати	500 000 грн/рік	851 500 грн/рік	Вища через нагрівачі та вентиляцію
Втрати зерна	5%	2%	Значне зменшення втрат зерна
Економічний ефект від збереженого зерна	1 200 000 грн/рік	4 800 000 грн/рік	Підвищення ефективності виробництва
Термін окупності	0,5 року (~6 місяці)	0,055 року (~20 днів)	Впровадження нової системи окупується значно швидше
Якість зерна	Нижча	Вища	Менше домішок, рівномірна вологість
Енергоспоживання	30 кВт	50 кВт	Більше через нагрів та активне вентилявання
Екологічний вплив	Високий пил	Мінімальний пил та пилозахист	Нове обладнання оснащене пиловловлювачами та витяжкою

Висновки

1. Впровадження системи активного вентилявання та очищення зерна дозволяє зменшити втрати зерна з 5% до 2%, що суттєво підвищує ефективність виробництва.
2. Нове обладнання забезпечує покращену якість зерна, рівномірну вологість та зменшення домішок, що підвищує його ринкову цінність.
3. Економічний ефект від впровадження системи становить 4 800 000 грн/рік, що перевищує витрати на капітальні вкладення та експлуатацію, а термін окупності складає лише близько 20 днів, що демонструє високу економічну доцільність.
4. Порівняння з базовим обладнанням показало, що нова система значно зменшує термін окупності та підвищує прибутковість виробництва.
5. Використання активного вентилявання також дозволяє контролювати енергоспоживання, знижує екологічне навантаження та підвищує безпеку виробничого процесу.

ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз існуючих способів очищення та активного вентилявання зерна, визначено їхні переваги та недоліки, що дозволило обрати ефективну технологію для насипного зерна.

2. Розроблено конструкцію установки з перфорованою центральною трубою та спіралеподібним відведенням відпрацьованого повітря, що забезпечує рівномірний розподіл повітряного потоку та виключає потребу у внутрішніх перемішувальних механізмах.

3. Проведено експериментальні дослідження, визначено оптимальні параметри процесу: висота шару 1 м, швидкість повітря 1,2 м/с та температура 80 °С, що забезпечує мінімальні енергозатрати та високий коефіцієнт очищення.

4. Побудовані регресійні рівняння та графіки залежності коефіцієнта очищення і кінцевої вологості зерна від товщини шару, швидкості повітря та висоти камери, що дозволяє прогнозувати параметри процесу.

5. Встановлено гідравлічний опір пневмокамери близько 18 Па, що обґрунтовує параметри конструкції установки та ефективність її роботи.

6. Впровадження системи зменшує втрати зерна з 5% до 2%, покращує якість продукції, рівномірну вологість та ринкову цінність зерна.

Система дозволяє вентилювати всю зернову масу або лише осередки самонагрівання, що знижує енергоспоживання та підвищує ефективність процесу.

7. Техніко-економічний розрахунок підтвердив високу ефективність проекту: економічний ефект складає 4 800 000 грн/рік, а термін окупності – близько 20 днів.

8. Розроблена технологія є економічно доцільною, технологічно ефективною та екологічно безпечною для впровадження на сучасних елеваторах і зерносховищах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гутаревич Ю.Ф. *Технологія післязбиральної обробки зерна*. — Київ: Аграрна наука, 2017. — 256 с.
2. Кисіль В.І. *Машини для очищення і сортування зерна*. — Харків: ХНТУСГ, 2018. — 184 с.
3. Mohsenin N.N. *Physical Properties of Plant and Animal Materials*. — New York: Gordon and Breach, 2019. 720 p.
4. Zhang Q., Liu H. Advances in pneumatic separation of agricultural materials. *Biosystems Engineering*. 2020. Vol. 190. P. 45–58.
5. Іванов О. В. Розробка та дослідження низькорамного розкидача для внесення органо-мінеральних добрив. Київ: Інститут механізації сільського господарства НААН України, 2021. 120 с.
6. Петров С. І. *Технології сушіння та зберігання зерна: підручник*. Харків: ХНУ ім. В. Каразіна, 2020. 256 с.
7. Коваленко М. П. *Активне вентилявання зерна: теорія і практика*. Київ: Аграрна освіта, 2019. 184 с.
8. ASTM D698-12. *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort*. ASTM International, 2012.
9. Mujumdar A. S. *Handbook of Industrial Drying*. 4th ed. Boca Raton: CRC Press, 2014. 856 p.
10. Chen L., Wang S. Optimization of Grain Drying and Storage Systems // *Journal of Food Engineering*. 2020. Vol. 278. P. 109933.
11. Ganesan V., Singh R. Aerodynamic and Thermal Behavior in Grain Storage Systems // *Food and Bioproducts Processing*. 2019. Vol. 115. P. 1–12.
12. Мельник Ю. В. *Зберігання та сушіння зерна*. Львів: Світосвіт, 2017. 232 с.
13. FAO. *Grain Storage Techniques: Evolution and Prospects*. Rome: Food and Agriculture Organization, 2015.

14. Харченко В. П., Бондаренко І. С. Енергозбереження в технологічних процесах зерносховищ. Київ: НАУ, 2020. 144 с.

15. Гапонюк О. І., Остапчук М. В., Станкевич Г. М., Гапонюк І. І. Активне вентильовання та сушіння зерна. Одеса: ВМВ, 2014. 326 с.

16. Дацишин О. В., Ткачук А. І., Гвоздєв О. В. Технологічні розрахунки процесу очищення, сушіння та активного вентильовання зернової маси. Чернівці: ЧНУ, 2017. 182 с.

17. Ялпачик В. Ф. Обладнання складів. Зберігання зерна і зернопродуктів. Львів: Світосвіт, 2016. 144 с.

18. Підручник «Технологія зберігання та переробки продукції рослинництва». Харків: ХНТУСГ, 2018. 298 с.

19. Мельник Ю. В. Зберігання та сушіння зерна. Львів: Світосвіт, 2017. 232 с