

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра механічної та електричної інженерії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
на здобуття ступеня вищої освіти магістр
бакалавр, магістр

на тему: «Модернізація конструкції та експлуатаційного сервісу
циліндричних силосів для підвищення ефективності зберігання
сільськогосподарської продукції»

Виконав: здобувач вищої освіти за
освітньо-науковою програмою
Сервісна інженерія в
агропромисловому виробництві
назва ОПП
спеціальності 133 Галузеве
машинобудування, 208 Агроінженерія
код та найменування спеціальності
ступеня вищої освіти магістр групи 1
ЗІМІН Володимир*Прізвище та ініціали здобувача*
вищої освіти
Керівник: Левченко Ю. В.
Прізвище та ініціали керівника
Рецензент: Яхін С. В.
Прізвище та ініціали рецензента

ПОЛТАВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерно-технологічний
Кафедра механічної та електричної інженерії

Міждисциплінарна освітньо-наукова програма
«Сервісна інженерія в агропромисловому виробництві»

Спеціальності: 133 «Галузеве машинобудування», 208 «Агроінженерія»
Ступінь вищої освіти магістр

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри механічної
та електричної інженерії,
канд. техн. наук, доцент,

Станіслав ПОПОВ
16 квітня 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

ЗІМІН Володимир

1. Тема роботи: *«Модернізація конструкції та експлуатаційного сервісу циліндричних силосів для підвищення ефективності зберігання сільськогосподарської продукції»*,

керівник роботи *кандидат техн. наук, доцент ЛЕВЧЕНКО Юлія*,
затверджено засіданням кафедри, протокол № _____ від _____ р.

2. Строк подання здобувачем вищої освіти роботи – 05 травня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: *аналіз літературних джерел Полтавської обласної універсальної наукової бібліотеки імені Івана Котляревського; аналіз літературних джерел Національної бібліотеки України імені Володимира Вернадського; сучасний досвід підприємств машинобудування та АПК за тематичним спрямуванням.*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

Розділ 1. Аналіз існуючих досліджень.

Розділ 2. Теоретичні положення.

Розділ 3. Методика досліджень.

Розділ 4. Результати експериментів.

Розділ 5. Практична реалізація розробок.

5. Перелік ілюстраційного матеріалу: *титульний аркуш; назва теми, мета і задачі дослідження; огляд літературних джерел; методика досліджень (моделі, плани експериментів, перевірка адекватності математичних моделей); результати експериментальних досліджень; висновки.*

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Власне ім'я, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання отримав
Практична реалізація розробок	Володимир ДУДНИК, доцент кафедри механічної та електричної інженерії		
	Петро МАКАРЕНКО, професор кафедри економіки та публічного управління		
	Павло ПИСАРЕНКО, завідувач кафедри екології, збалансованого природокористування та захисту довкілля		

7. Дата видачі завдання 16 квітня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з.п.	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вибір і затвердження теми роботи	До 16.04.25	
2	Складання і затвердження розгорнутого плану та завдання на кваліфікаційну роботу	20.04-26.04.25	
3	Опрацювання літературних джерел		
4	Збір, вивчення і обробка інформації, необхідної для виконання роботи	27.04-31.04.25	
5	Виконання розділів роботи	18.05-31.03.25	
6	Оформлення тексту роботи		
7	Попередній захист роботи на кафедрі	19.04-23.04.26	
8	Доопрацювання роботи з урахуванням зауважень і пропозицій	26.04-04.05.26	
9	Нормалізаційний контроль		
10	Захист кваліфікаційної роботи	20.05-26.05.26	

Здобувач вищої освіти _____ Володимир ЗІМІН
(підпис)

Керівник роботи _____ Юлія ЛЕВЧЕНКО
(підпис)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 5 розділів, 34 рисунки, 13 таблиць, 40 використаних джерел, 137 сторінок.

Мета роботи – підвищення ефективності функціонування циліндричних силосів для зберігання сільськогосподарської продукції шляхом модернізації конструкції, зниження матеріаломісткості та вдосконалення системи експлуатаційного сервісу.

Об'єкт дослідження – процес функціонування та експлуатації циліндричних силосів для зберігання сільськогосподарської продукції.

Предмет дослідження – конструктивні параметри циліндричних силосів та показники експлуатаційного сервісу, що впливають на ефективність роботи, надійність конструкції, напружено-деформований стан і технічний ресурс обладнання.

Практична значущість роботи полягає в обґрунтуванні та розробленні конструктивних і сервісних рішень, спрямованих на підвищення надійності конструкції силосів, зменшення матеріаломісткості, покращення умов експлуатації та скорочення витрат на технічне обслуговування. Запропоновані рішення можуть бути використані під час модернізації існуючих силосних комплексів і проєктування нових систем зберігання сільськогосподарської продукції.

У першому розділі виконано аналіз сучасного стану конструкцій циліндричних силосів та досліджень у галузі систем зберігання сипких матеріалів. Розглянуто класифікацію силосних конструкцій, особливості їх будови, характерні дефекти та пошкодження металоконструкцій. Встановлено, що основними причинами зниження надійності силосів є нерівномірність навантажень, корозійні процеси, локальні деформації та недосконалість систем технічного обслуговування.

У другому розділі наведено теоретичні положення функціонування циліндричних силосів, виконано аналіз навантажень, що діють на конструкцію, та досліджено особливості напружено-деформованого стану оболонки.

Обґрунтовано доцільність використання змінної товщини стінок оболонки та застосування сучасних матеріалів і конструктивних рішень для підвищення ефективності роботи конструкції.

У третьому розділі розроблено методику проведення досліджень. Описано програму та загальну схему досліджень, методику визначення напружено-деформованого стану конструкції, оцінювання показників надійності та технічного стану, а також методику дослідження систем сервісного забезпечення і техніко-економічного оцінювання ефективності модернізації.

У четвертому розділі представлено результати дослідження технічного стану конструкції, впливу конструктивних параметрів на показники роботи силоса та аналіз результатів модернізації. Встановлено закономірності зміни напружень і прогинів залежно від співвідношення геометричних параметрів конструкції та товщини стінок оболонки. Визначено, що використання ступінчасто-змінної товщини стінки дозволяє зменшити масу конструкції приблизно на 11 %, знизити витрати металу на 942 кг та зменшити максимальні прогини до 36 %.

У п'ятому розділі виконано практичну реалізацію запропонованих розробок та сформовано комплекс сервісно-інженерних рішень щодо підвищення ефективності експлуатації силосів. Розроблено систему автоматизованого моніторингу технічного стану конструкції, рекомендації щодо організації технічного обслуговування та оцінено екологічні й економічні показники впровадження запропонованих рішень.

Рекомендації щодо використання результатів роботи: результати можуть бути використані під час модернізації та проектування силосних комплексів, а також у навчальному процесі закладів вищої освіти аграрного й технічного профілю.

Сфера застосування результатів роботи – підприємства агропромислового комплексу, зернопереробні підприємства, елеваторні комплекси, комбикормові заводи та підприємства зі зберігання сипких матеріалів.

Текст роботи пройшов перевірку на плагіат за допомогою сервісу Strike Plagiarism та є оригінальним – %.

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота магістра присвячена підвищенню ефективності функціонування циліндричних силосів шляхом модернізації конструкції, зменшення матеріаломісткості та вдосконалення системи експлуатаційного сервісу. У роботі проаналізовано сучасний стан конструкцій силосів, досліджено вплив конструктивних параметрів на напружено-деформований стан конструкції та показники її надійності. Запропоновано технічні рішення щодо зниження матеріаломісткості, підвищення жорсткості конструкції та впровадження автоматизованих систем моніторингу технічного стану.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЦИЛІНДРИЧНИЙ СИЛОС, ЗЕРНОВА МАСА, НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН, МОДЕРНІЗАЦІЯ КОНСТРУКЦІЇ, МАТЕРІАЛОМІСТКІСТЬ, НАДІЙНІСТЬ, ЕКСПЛУАТАЦІЙНИЙ СЕРВІС, МОНІТОРИНГ, ТЕХНІЧНЕ ОБСЛУГОВУВАННЯ, АВТОМАТИЗОВАНИЙ КОНТРОЛЬ.

ANNOTATION

The master's qualification work is devoted to improving the efficiency of cylindrical silos for agricultural product storage through structural modernization, reducing material consumption, and improving operational service systems. The study analyzes the current state of silo structures and investigates the influence of structural parameters on the stress-strain state and reliability indicators. Technical solutions aimed at reducing material consumption, improving structural rigidity, and implementing automated monitoring systems are proposed.

KEYWORDS: CYLINDRICAL SILO, GRAIN MASS, STRESS-STRAIN STATE, STRUCTURAL MODERNIZATION, MATERIAL CONSUMPTION, RELIABILITY, OPERATIONAL SERVICE, MONITORING, MAINTENANCE, AUTOMATED CONTROL.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	9
1.1. Загальна характеристика циліндричних силосів для зберігання сільськогосподарської продукції	9
1.2. Сучасні конструктивні рішення циліндричних силосів	17
1.3. Конструктивні особливості циліндричних силосів	24
1.4. Основні дефекти та пошкодження силосів	28
Висновки до розділу 1	31
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ	33
2.1. Теоретичні основи роботи циліндричних силосів	33
2.2. Аналіз навантажень на конструкцію силоса	37
2.3. Теоретичні основи напружено-деформованого стану конструкції	51
2.4. Теоретичні засади вдосконалення сервісного забезпечення	59
Висновки до розділу 2	63
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ	66
3.1. Програма та загальна схема досліджень	66
3.2. Методика дослідження напружено-деформованого стану конструкції	68
3.3. Методика оцінювання надійності та технічного стану	82
3.4. Методика дослідження систем сервісного забезпечення	92
Висновки до розділу 2	94
РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ	96
4.1. Результати аналізу технічного стану конструкції	96
4.2. Дослідження напружено-деформованого стану силоса	100
4.3. Результати дослідження впливу конструктивних параметрів	105
4.4. Оцінка впливу модернізації на показники роботи	109
4.5. Аналіз показників надійності та сервісної придатності	111
Висновки до розділу 2	113
РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБКИ	115
5.1. Розроблення системи експлуатаційного сервісу	115
5.2. Економічна ефективність	120
5.3. Екологічність виробництва та зниження негативного впливу	129
5.4. Охорона праці та безпека	131
Висновки до розділу	133
ВИСНОВОК ТА ПРОПОЗИЦІЇ	135
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	137

ВСТУП

У сучасних умовах розвитку агропромислового комплексу одним із важливих завдань є забезпечення ефективного зберігання сільськогосподарської продукції з мінімальними втратами її кількісних та якісних показників. Значна роль у вирішенні цього завдання належить системам зберігання зернових і сипких матеріалів, важливим елементом яких є циліндричні силоси. Використання силосних конструкцій дозволяє організувати безперервність технологічних процесів, підвищити рівень механізації та автоматизації виробництва, а також забезпечити збереження продукції протягом тривалого часу.

Циліндричні силоси широко застосовуються у зернопереробній, комбікормовій, борошномельній та інших галузях сільського господарства. Основними перевагами таких конструкцій є висока місткість, компактність розміщення, простота виготовлення, можливість автоматизації процесів завантаження та розвантаження, а також порівняно низькі експлуатаційні витрати. Однак під час експлуатації силосів виникає ряд проблем, пов'язаних із нерівномірним розподілом навантажень, зношуванням елементів конструкції, корозійними процесами, виникненням деформацій та необхідністю забезпечення надійного технічного сервісу.

Аналіз сучасних конструкцій показує, що традиційні підходи до проектування силосів часто призводять до підвищеної матеріаломісткості конструкції та збільшення витрат на їх виготовлення й подальше обслуговування. Значна частка витрат пов'язана не лише з виробництвом конструкцій, але й із забезпеченням їх технічної справності протягом усього життєвого циклу. У зв'язку з цим актуальним є вдосконалення конструктивних рішень силосів та підвищення ефективності їх експлуатаційного сервісу.

Актуальність теми полягає у необхідності підвищення ефективності використання циліндричних силосів шляхом удосконалення конструктивних елементів, зменшення матеріаломісткості, підвищення надійності конструкцій та вдосконалення системи технічного обслуговування й сервісного супроводу.

Об'єктом дослідження є процес функціонування та експлуатації циліндричних силосів для зберігання сільськогосподарської продукції.

Предметом дослідження є конструктивні параметри циліндричних силосів та показники експлуатаційного сервісу, що впливають на ефективність їх функціонування.

Метою кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності зберігання сільськогосподарської продукції шляхом модернізації конструкції циліндричних силосів та удосконалення системи їх експлуатаційного сервісу.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз сучасних конструкцій циліндричних силосів та особливостей їх експлуатації;
- дослідити фактори, що впливають на ефективність функціонування силосів;
- проаналізувати характерні дефекти та причини виникнення пошкоджень конструктивних елементів;
- обґрунтувати напрямки модернізації конструкції силоса;
- розробити рекомендації щодо вдосконалення системи технічного обслуговування та експлуатаційного сервісу;
- провести оцінку ефективності запропонованих рішень.

У роботі використано такі методи дослідження: аналіз літературних джерел, методи математичного моделювання, розрахункові методи визначення параметрів конструкції, методи технічного аналізу та статистичної обробки результатів.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання запропонованих конструктивних рішень та рекомендацій щодо експлуатаційного сервісу для підвищення надійності роботи силосів, зменшення витрат на їх технічне обслуговування та забезпечення більш ефективного зберігання сільськогосподарської продукції.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1.1. Загальна характеристика циліндричних силосів для зберігання сільськогосподарської продукції

Циліндричні силоси належать до найбільш поширених типів споруд для зберігання сільськогосподарської продукції та широко застосовуються у зернопереробній, комбікормовій, борошномельній і харчовій галузях. Їх використання забезпечує тривале зберігання зернових культур, насіння, комбікормів та інших сипких матеріалів із мінімальними втратами якості та кількості продукції.

Сучасне сільськогосподарське виробництво потребує ефективних систем накопичення та зберігання продукції, здатних забезпечувати безперервність виробничих процесів і зменшувати втрати під час транспортування та переробки. Саме тому силосні споруди є важливою складовою технологічних комплексів агропромислового виробництва.

Силосом називають ємність для зберігання сипких матеріалів із незмінним поперечним перерізом круглої, прямокутної або багатокутної форми в плані (рисунок 1), для якої виконується умова $H > 1,54A$, де A – площа поперечного перерізу силоса. При цьому під H розуміють висоту стінки, відлічену від верхньої частини днища. Зазначений критерій, запропонований Дішингером, Запропонований підхід покладено в основу сучасних нормативних методик визначення навантажень на силосні конструкції, що використовуються під час проектування силосів відповідно до вимог європейських стандартів серії Eurocode, зокрема ДСТУ-Н Б EN 1991-4 «Дії на конструкції. Частина 4: Силоси та резервуари. Для силосів круглого перерізу виконується співвідношення $H > 1,33B$, а для квадратного – $H > 1,5B$, де B – найбільший діаметр кола, вписаного в поперечний переріз силоса.

Циліндричний силос являє собою вертикальну ємність, висота якої суттєво перевищує поперечний розмір. Основними елементами конструкції є – циліндрична оболонка (обечайка); конічне або плоске днище; покрівля; опорні конструкції; системи завантаження та розвантаження; вентиляційне обладнання; контрольно-вимірювальні пристрої; допоміжні сервісні елементи.

Залежно від конструктивного виконання силоси можуть бути виготовлені із сталі; залізобетону; алюмінієвих сплавів; полімерних матеріалів.

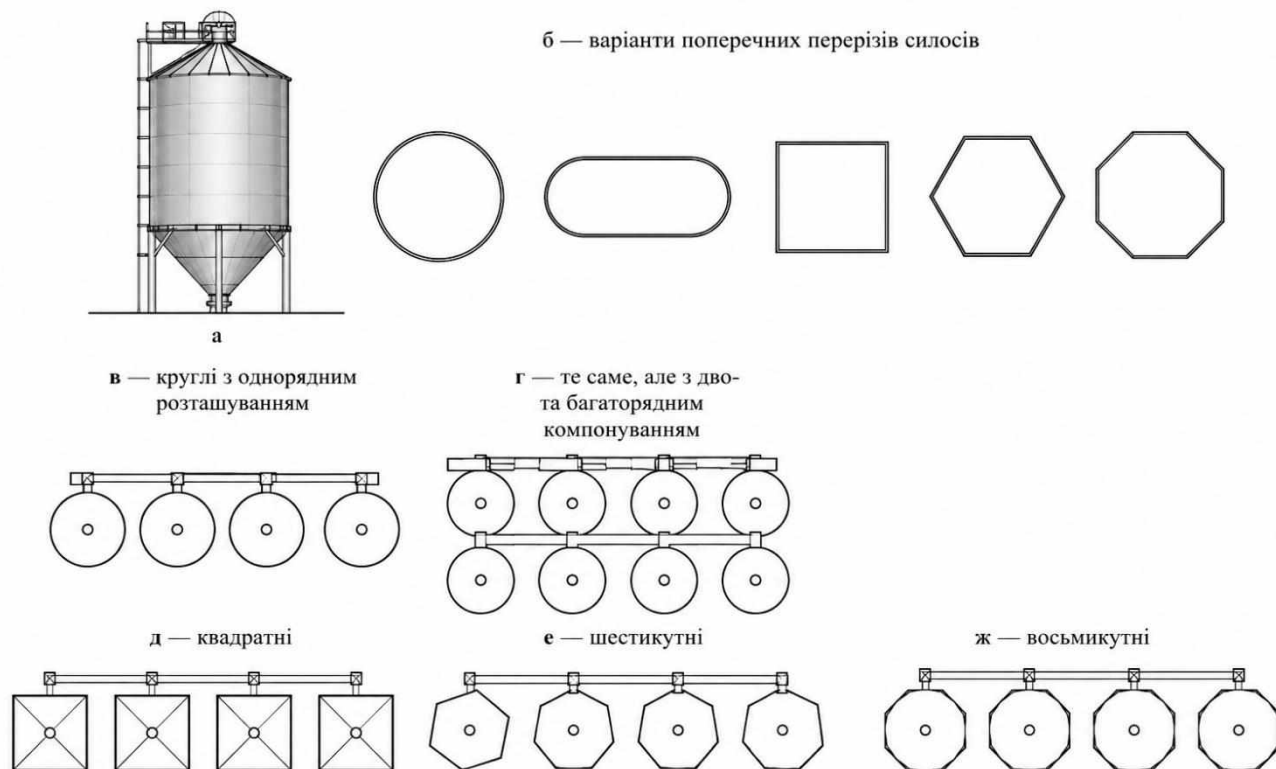
Найбільшого поширення набули сталеві циліндричні силоси, що пояснюється їх порівняно невеликою масою, високою міцністю, простотою монтажу та економічною ефективністю. Крім того, такі конструкції дозволяють застосовувати типові модульні елементи та забезпечують можливість подальшої модернізації.

В Україні найбільш поширеними є силоси круглого та квадратного перерізу. Перевага зазвичай надається круглим конструкціям завдяки простоті їх виготовлення, оскільки їхні стінки переважно працюють на центральне розтягнення. Крім того, для таких ємностей потрібно менше матеріалу на одиницю об'єму збереженого продукту.

У випадках, коли необхідно розмістити значну кількість невеликих силосів для різних матеріалів або одного матеріалу різних сортів, доцільно застосовувати силоси квадратного перерізу (рисунок 1, б), які є ефективними за умови, що довжина сторін не перевищує 3–4 м. При збільшенні цих розмірів у стінках квадратних або прямокутних конструкцій виникають значні згинальні моменти, що потребує відповідного збільшення їх товщини.

Габарити силосів, їх конфігурація, кількість, способи передавання навантаження на фундамент, а також планувальне розміщення визначаються відповідно до вимог технологічного процесу, умов завантаження й вивантаження та з урахуванням техніко-економічних факторів.

За висотою силоси зазвичай поділяються на підсилосну, силосну (основну ємнісну) та надсилосну частини.



(а – циліндричний силос із конічною розвантажувальною воронкою; б – варіанти поперечних перерізів силосів; в – круглі з однорядним розташуванням; г – те саме, але з дво- та багаторядним компонуванням; д – квадратні; е – шестикутні; ж – восьмикутні)

Рисунок 1.1 – Схема силосів і силосних корпусів.

Підсилосна частина виконується у вигляді системи колон, призначених для передавання маси конструкції та засипаного матеріалу через фундамент на ґрунтову основу. Колони розміщують у зоні з'єднання тонкостінної циліндричної обичайки з приєднаною знизу конічною воронкою.

Конічна воронка забезпечує покращення умов витікання сипкого матеріалу. Вивантаження здійснюється під дією власної ваги матеріалу при відкриванні випускного отвору, розташованого в центрі воронки.

Мінімальний кут нахилу стінок воронки до горизонтальної площини має перевищувати кут природного укосу матеріалу на 5–10°.

Для циліндричної оболонки характерне виникнення локальних напружень у місцях її закріплення біля покриття та днища, які швидко зменшуються з віддаленням від цих зон, що відповідає прояву крайового ефекту. Для його

послаблення у зоні стику конічної та циліндричної частин встановлюють кільце жорсткості, що також враховує вплив корозійної втоми та підвищує надійність конструкції. Оскільки силоси працюють в умовах циклічних навантажень, спричинених процесами «завантаження–розвантаження», у зоні стику необхідно забезпечити рівень стискаючих зусиль нижче межі витривалості зварного шва, що досягається встановленням кільцевого шпангоута ([26], [27]). Конструкцію вузла перетину оболонок наведено на рисунку 2.

Циліндрична та конічна частини силоса належать до листових конструкцій у вигляді тонкостінних суцільних оболонок, які виконують як несучі, так і огорожувальні функції.

Циліндричну частину сталевих силосів формують по висоті з кількох ярусів. Ширина кожного ярусу визначається розмірами сталевих листів і зазвичай становить 800...1600 мм. Яруси виготовляють шляхом стикового зварювання листів, причому ці з'єднання орієнтовані паралельно осі циліндра та утворюють поздовжні шви. Між собою яруси з'єднуються поперечними (кільцевими) стиковими швами.

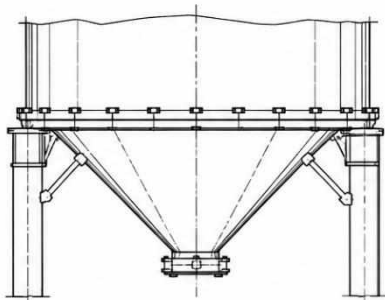
Надсилосна частина силосів являє собою стаціонарне покриття конічної форми, яке виготовляється з окремих транспортабельних щитів заводського виробництва.

Силосні комплекси можуть включати не лише самі силоси, а й обладнання для завантаження та вивантаження (елеватори, транспортери, підйомні механізми, крани, навантажувачі, різні спускні пристрої), засоби для активізації витікання матеріалів із низькою сипучістю, затвори, живильники, а також системи автоматизації та контролю.

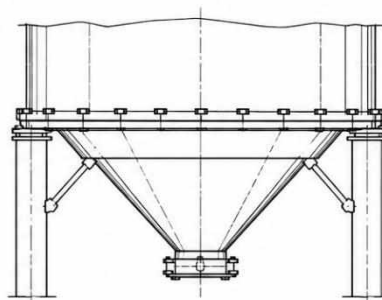
За функціональним призначенням силоси класифікують на:

- силоси короткочасного зберігання;
- силоси тривалого зберігання;
- накопичувальні силоси;
- технологічні силоси;
- перевантажувальні силоси.

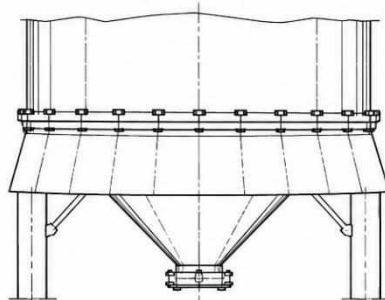
а — з'єднання з конічною вставкою



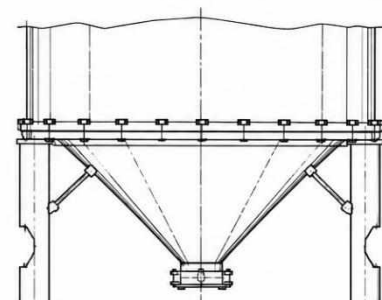
б — з'єднання з відбортовкою



в — з'єднання з конічним «фартухом»



г — з'єднання з вирізом частини опорної колони



(а — з'єднання з конічною вставкою; б — з'єднання з відбортовкою; в — з'єднання з конічним «фартухом»; г — з'єднання з вирізом частини опорної колони)

Рисунок 1.2 – Варіанти виконання стикових вузлів.

За формою поперечного перерізу розрізняють круглі; квадратні; багатокутні силоси.

Найчастіше застосовуються конструкції круглого поперечного перерізу, оскільки вони забезпечують більш рівномірний розподіл навантажень по поверхні оболонки, характеризуються меншою матеріаломісткістю та кращими умовами роботи конструкції при дії внутрішнього тиску сипкого матеріалу.

Циліндричні силоси можуть розміщуватись як окремо, так і групуватися у силосні корпуси. Залежно від схеми компонування застосовують однорядне розміщення; дворядне розміщення; багаторядне розміщення.

Групове розташування дозволяє більш ефективно використовувати виробничі площі, скорочувати довжину транспортних комунікацій і знижувати витрати на експлуатацію.

Під час експлуатації силоси зазнають впливу значної кількості навантажень, серед яких: тиск сипкого матеріалу; власна вага конструкції; вітрові навантаження;

снігові навантаження; температурні впливи; динамічні навантаження під час завантаження та розвантаження.

Особливістю роботи циліндричних силосів є нерівномірний характер розподілу навантажень від зернової маси, що може спричиняти виникнення локальних зон підвищених напружень, деформацій та пошкоджень конструктивних елементів.

Для забезпечення належних умов зберігання сільськогосподарської продукції сучасні силоси обладнуються системами активного вентилявання; температурного контролю; контролю вологості; автоматизованого керування; моніторингу технічного стану конструкції.

Використання сучасних систем автоматизації дозволяє контролювати параметри зберігання продукції в режимі реального часу та своєчасно виявляти можливі відхилення.

Основними перевагами циліндричних силосів є: висока місткість при відносно невеликих площах забудови; можливість механізації та автоматизації технологічних процесів; зменшення втрат продукції; скорочення витрат на транспортування та зберігання; можливість модульного розширення комплексу; відносно низькі експлуатаційні витрати.

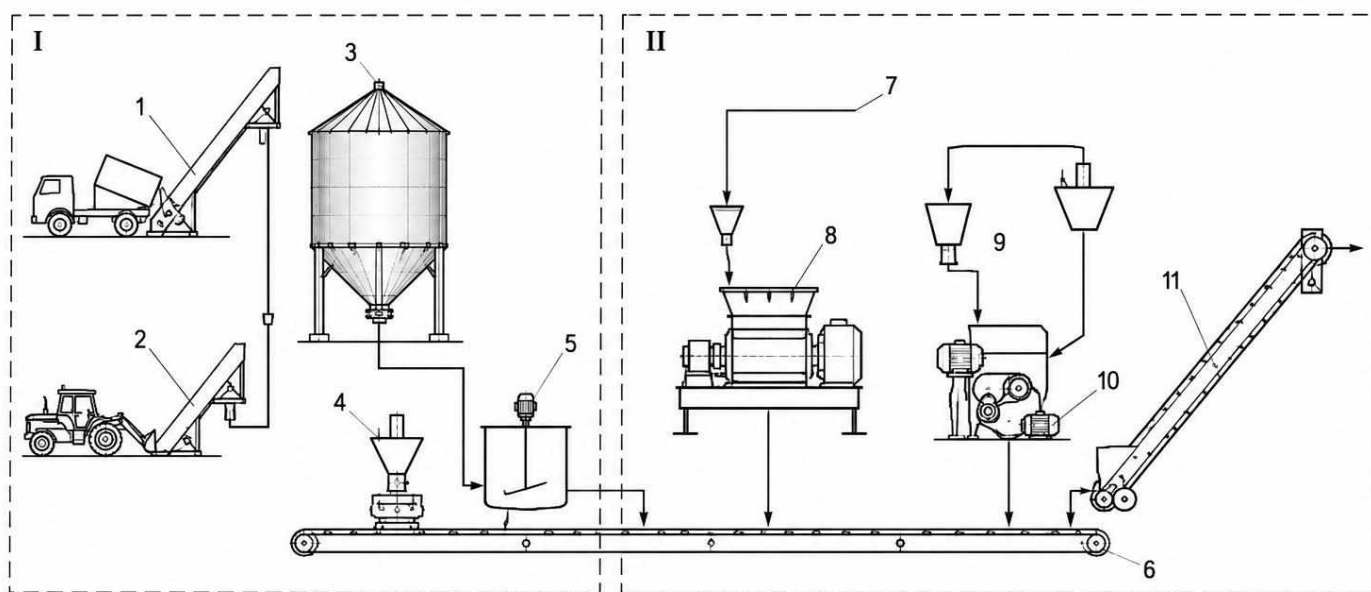
Разом із перевагами існують і певні недоліки конструкцій, серед яких необхідно відзначити: виникнення корозійних процесів; можливість утворення склепінь сипкого матеріалу; нерівномірність розподілу тиску на стінки; складність виконання ремонтних робіт; значні витрати при порушенні режимів експлуатації.

Таким чином, циліндричні силоси є важливим елементом систем зберігання сільськогосподарської продукції. Їх конструктивні особливості та умови експлуатації безпосередньо впливають на ефективність функціонування всього технологічного комплексу, що обумовлює необхідність подальшого вдосконалення конструкції та систем експлуатаційного сервісу.

Бункери, силоси та силосні установки є основними спорудами для зберігання сипких матеріалів у сільському господарстві. Вони використовуються як окремі технічні одиниці або як складові транспортно-технологічних ліній у межах

комплексної механізації виробництва (кормоцехи, зерноочисні комплекси, зернохосвища, сільськогосподарська техніка тощо) і призначені для тимчасового зберігання, перероблення та вивантаження сипкої продукції (зерна, борошна, продукції комбікормової галузі тощо).

Технологічну схему використання силосів у процесі приготування кормових сумішей наведено на рисунку 3. Пресовані грубі корми (у рулонах) подрібнюють і вводять до складу суміші без попередньої теплової обробки. Приготування кормових сумішей здійснюється роздільно, одночасно у двох основних технологічних лініях, що включають етапи збору, змішування та додаткового подрібнення компонентів, які завантажуються пошарово, внесення поживних добавок і подальше вивантаження. Продуктивність кожної з ліній становить до 15–20 т/год.



(I та II – секції кормоцеху; 1 – живильник-завантажувач силоса (сінажу) ПЗМ-1,5; 2 – живильник для подачі грубих кормів ПЗМ-1,5М; 3 – силос для сухих кормів; 4 – дозатор концентрованих кормів ДК-10; 5 – змішувач поживних розчинів СМ-1,7; 6 – збірний стрічковий транспортер ТЛ-100; 7 – лінія подачі мінеральних добавок; 8 – подрібнювач-змішувач ІСК-3М; 9 – дозатор коренеплодів; 10 – мийно-подрібнювальний агрегат для коренеплодів ІКМ-5; 11 – транспортер-завантажувач ТЗК-30М)

Рисунок 1.3 – Технологічна схема застосування силосів у виробництві кормів.

Силоси широко застосовуються не лише в аграрній сфері, але й у хімічній, харчовій та гірничодобувній промисловості, де вони забезпечують стабільне функціонування технологічних процесів.

Використання безтарних технологій під час відпуску, транспортування, приймання та зберігання сипких матеріалів істотно підвищує рівень механізації та автоматизації виробництва, сприяє зростанню продуктивності праці, ефективнішому використанню складських ємностей і транспортних засобів, а також зводить до мінімуму застосування ручної праці. Крім цього, такий підхід дозволяє зменшити втрати продукції, скоротити витрати на тару та пакування і покращити санітарно-гігієнічні умови праці.

Зокрема, використання силосів для зберігання та перероблення сировини і готової продукції дає змогу підприємствам борошномельної, комбикормової та пивоварної галузей відмовитися від трудомістких операцій із мішками, що сприяє автоматизації виробництва та зменшенню чисельності персоналу.

При безтарному транспортуванні і зберіганні сипких матеріалів витрати на перевезення однієї тонни вантажу знижуються у 3–5 разів, вартість вантажно-розвантажувальних робіт скорочується у 3–4 рази, забезпечується їх комплексна механізація й автоматизація, втрати продукції зменшуються у 5–10 разів, а витрати на спорудження складів і необхідна площа для їх розміщення зменшуються більш ніж удвічі. Крім того, повністю усуваються витрати на тару, фасування та пакування вантажу [1]. Водночас силоси, займаючи відносно невелику площу, можуть мати значну місткість, причому їх висота здебільшого обмежується лише несучою здатністю ґрунтів.

Незважаючи на суттєві переваги безтарного способу зберігання і транспортування сипких матеріалів, існує низка проблем, що виникають переважно при роботі з матеріалами з низькою сипучістю. Покращення безперервності витікання досягається завдяки використанню спеціальних пристроїв (живильників, активаторів, стабілізаторів потоку та тиску), обробці внутрішніх поверхонь розвантажувальних воронки, що знижує коефіцієнт зовнішнього тертя і сили зчеплення та підвищує швидкість вивантаження, а також якісному виконанню

заокруглень кутів, оскільки у цих зонах матеріал схильний до злежування.

Ефективність роботи силосних установок безпосередньо впливає на збереження продукції, якість транспортування, безперебійну роботу розвантажувальних механізмів, характеристики кінцевого продукту і, як наслідок, на економічну ефективність усього технологічного процесу.

1.2. Сучасні конструктивні рішення циліндричних силосів

Сучасний розвиток агропромислового виробництва супроводжується постійним зростанням вимог до ефективності технологічних процесів зберігання сільськогосподарської продукції. Це зумовлює необхідність удосконалення конструктивних рішень силосних споруд, спрямованих на підвищення їх надійності, довговічності, енергоефективності та зменшення матеріальних витрат. Особлива увага приділяється модернізації конструкцій циліндричних силосів, оскільки саме вони є найбільш поширеними об'єктами систем зберігання зернової продукції.

Конструкція сучасного циліндричного силоса являє собою складну інженерну систему, що включає основні несучі елементи та комплекс допоміжного обладнання для забезпечення безпечної та ефективної експлуатації.



Рисунок 1.4 – Загальна конструктивна схема сучасного циліндричного силоса

На рисунку 1.4 наведено конструкцію сучасного циліндричного силоса, що складається з циліндричного корпусу, конічного даху, систем завантаження та розвантаження, опорних конструкцій і допоміжного обладнання.

Основним несучим елементом конструкції є циліндрична оболонка, яка сприймає навантаження від маси сипкого матеріалу, власної ваги конструкції та зовнішніх навантажень. У сучасних силосах оболонка зазвичай виготовляється зі сталевих оцинкованих листів, з'єднаних між собою болтовими або зварними з'єднаннями.

Для виготовлення корпусів силосів переважно використовують: гарячеоцинковану конструкційну сталь; низьколеговані сталі; високоміцні сталі; корозійностійкі сплави.

Застосування оцинкованої сталі забезпечує високий рівень захисту конструкції від корозійних процесів, що особливо важливо при тривалому зберіганні продукції в умовах підвищеної вологості та впливу атмосферних факторів.

Сучасні конструктивні рішення передбачають використання ступінчастої зміни товщини листів по висоті корпусу. Такий підхід дозволяє забезпечити більш раціональний розподіл матеріалу відповідно до фактичного характеру навантажень.

У нижній частині силоса діють максимальні навантаження від тиску зернової маси, тому застосовуються листи більшої товщини. Верхні яруси піддаються меншим навантаженням, що дає можливість використовувати тонший метал.

Використання змінної товщини оболонки дозволяє зменшити матеріаломісткість конструкції; скоротити масу споруди; знизити витрати металу; зменшити собівартість виготовлення; забезпечити необхідний рівень міцності.

Особливе значення мають конструкції днищ силосів. Залежно від функціонального призначення застосовують декілька основних варіантів.

До них належать: плоскі днища; конічні днища; комбіновані конструкції.



Рисунок 1.5 – Варіанти конструктивного виконання днищ силосів

На рисунку 1.5 показано найбільш поширені конструкції днищ силосів: плоске, конічне та комбіноване.

Силоси з плоским днищем використовують переважно для тривалого зберігання зерна великих обсягів. Їх перевагами є висока місткість, простота конструкції та економічність.

Недоліками таких конструкцій є необхідність використання додаткових механізмів для розвантаження продукції.

Конічні днища забезпечують самопливне розвантаження матеріалу під дією сили тяжіння. Такі конструкції широко використовуються у технологічних лініях із безперервним виробничим циклом.

Кут нахилу стінок конічної воронки визначається фізико-механічними властивостями матеріалу і, як правило, перевищує кут природного укосу зернової маси на 5–10°.

Покрівля сучасних силосів може мати різне конструктивне виконання: конічне; купольне; сегментне.

Найбільшого поширення набули конічні дахи, які складаються із секцій заводського виготовлення.

Покрівля виконує не лише захисну функцію, але також сприймає навантаження від атмосферних опадів; вітрового впливу; температурних деформацій; технологічного обладнання.

До покрівлі часто кріпляться: транспортні механізми; завантажувальні системи; системи аспірації; датчики контролю; вентиляційне обладнання.

Для підвищення жорсткості конструкції сучасних силосів використовують кільцеві ребра жорсткості та вертикальні підсилювачі.

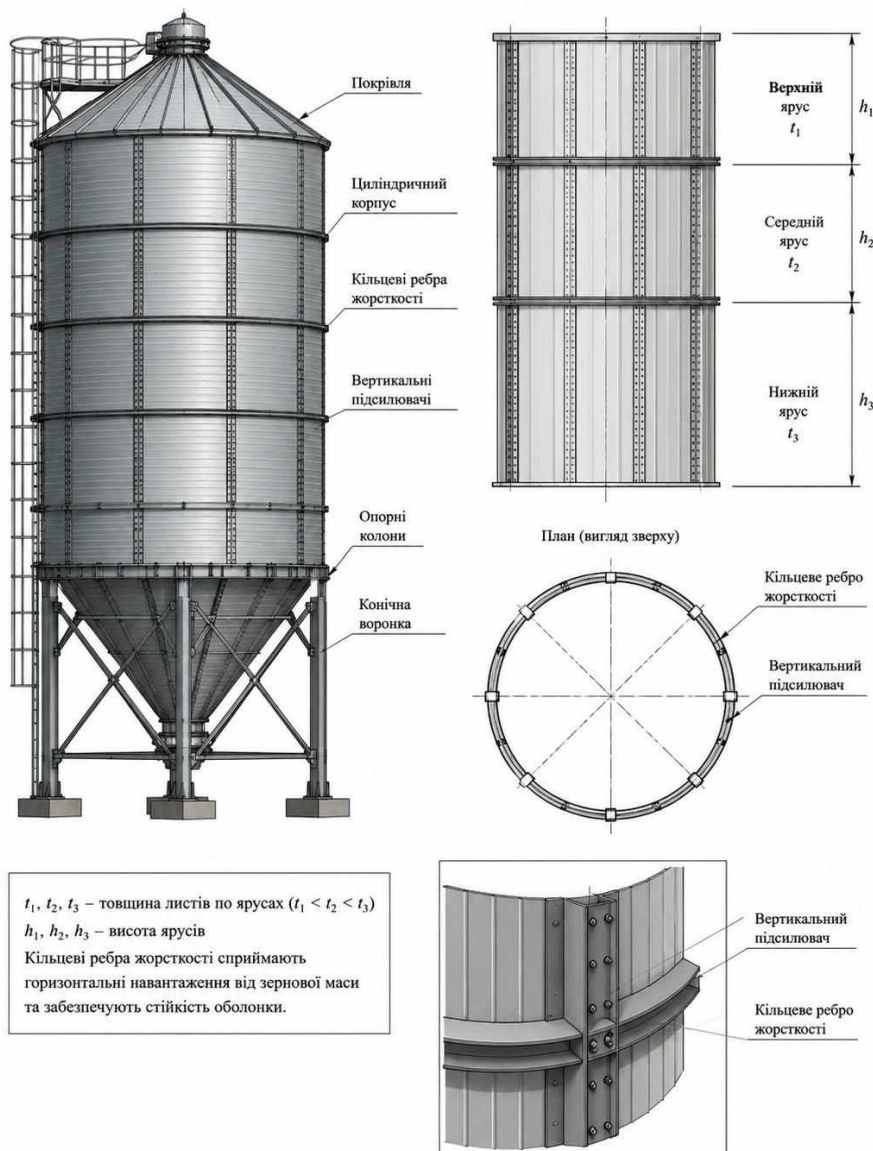
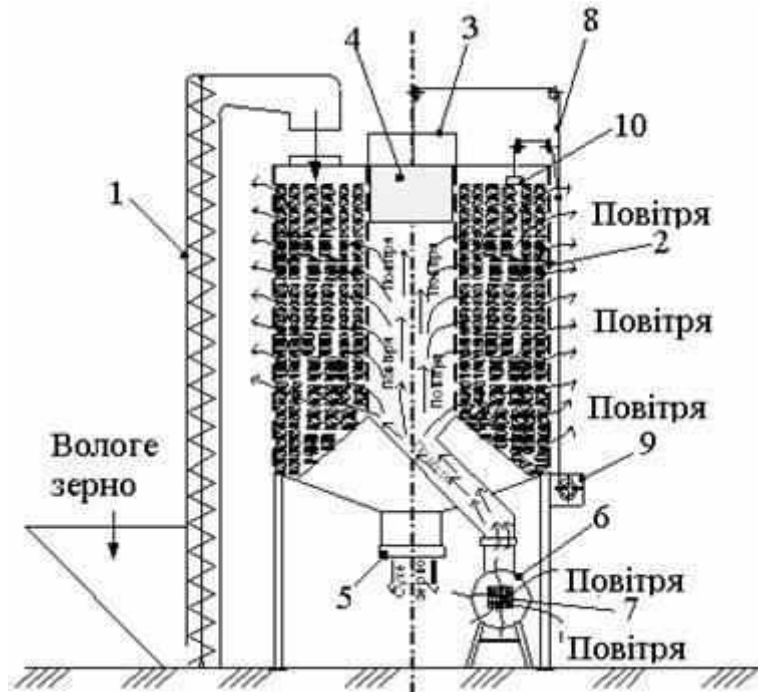


Рисунок 1.6 – Розміщення кільцевих ребер жорсткості та вертикальних підсилювачів на корпусі силоса.

Основними функціями елементів жорсткості є: зменшення деформацій корпусу; підвищення стійкості конструкції; рівномірний розподіл навантажень; запобігання локальній втраті стійкості оболонки.

Значний розвиток отримали системи активного вентиляювання зернової маси.



1 – норія (елеватор); 2 – зернова маса; 3 – завантажувальний пристрій; 4 – розподільник потоку; 5 – випускний отвір; 6 – повітропровід; 7 – вентилятор; 8 – датчики контролю; 9 – заслінка регулювання повітря; 10 – система подачі повітря.

Рисунок 1.7 – Схема системи аерації зернового силоса.

Система активного вентиляювання забезпечує подачу повітряних потоків через зернову масу з метою підтримання оптимальних температурних і вологісних параметрів під час зберігання продукції. Використання аераційних систем дозволяє зменшити ризик самозігрівання зерна, розвитку мікроорганізмів та погіршення його якості.

До складу систем аерації входять: повітропроводи; вентилятори; розподільчі канали; автоматизовані системи керування.

Вентиляція забезпечує зниження температури зерна; видалення надлишкової вологи; запобігання самозігріванню продукції; зменшення ризику розвитку мікроорганізмів.

Одним із сучасних напрямів модернізації силосів є впровадження систем автоматизованого моніторингу технічного стану.

До таких систем входять датчики температури; датчики вологості; тензометричні датчики; системи контролю рівня заповнення; системи дистанційного керування.

Використання автоматизованих систем дозволяє здійснювати безперервний контроль параметрів експлуатації та оперативно реагувати на виникнення аварійних ситуацій.

Окремим напрямом розвитку сучасних конструктивних рішень є впровадження сервісно-інженерних підходів до експлуатації силосів.



Рисунок 1.8 – Напрями модернізації конструкції та експлуатаційного сервісу циліндричних силосів

На рисунку 1.9 представлено основні напрями модернізації конструкції та експлуатаційного сервісу циліндричних силосів, спрямовані на підвищення

ефективності функціонування систем зберігання сільськогосподарської продукції. Комплексне вдосконалення силосних споруд передбачає не лише зміну окремих конструктивних елементів, але й інтеграцію сучасних технологічних, інформаційних та сервісних рішень.

Першим напрямом є конструктивна модернізація, яка передбачає оптимізацію геометричних параметрів силоса, удосконалення елементів жорсткості, застосування змінної товщини стінок по висоті, а також модернізацію вузлів з'єднання, покрівлі та днища. Реалізація таких заходів дозволяє зменшити матеріаломісткість конструкції та підвищити її міцність і стійкість.

Другий напрям пов'язаний із використанням сучасних матеріалів і захисних покриттів. Важливе значення має застосування оцинкованих і високоміцних сталей, антикорозійних покриттів, зносостійких матеріалів та сучасних ущільнювальних елементів, що забезпечують збільшення терміну служби обладнання та зниження витрат на ремонт.

Третім напрямом є впровадження систем автоматизації та контролю. До них належать датчики температури, вологості, рівня заповнення силоса, системи автоматичного керування вентиляцією та засоби передачі інформації в режимі реального часу. Використання автоматизованого контролю дозволяє підтримувати оптимальні параметри зберігання продукції та своєчасно виявляти можливі відхилення.

Окрему роль відіграє сервісне обслуговування, яке включає планово-попереджувальні роботи, технічну діагностику, перевірку обладнання, очищення поверхонь та своєчасну заміну зношених вузлів і деталей. Раціональна організація сервісного супроводу сприяє зменшенню ризику аварійних ситуацій та збільшенню надійності роботи силосів.

Наступним напрямом модернізації є цифровий моніторинг і аналітика, які базуються на використанні сучасних інформаційних технологій для збору, зберігання та аналізу експлуатаційних даних. Такі системи дозволяють виконувати

прогнозування технічного стану конструкції, виявляти критичні режими роботи та здійснювати дистанційне керування обладнанням.

Важливим складником сучасного розвитку силосних комплексів є підвищення енергоефективності та екологічності. Основними заходами є оптимізація роботи вентиляційних систем, застосування енергоощадного обладнання, зменшення втрат продукції та використання технологій, що мінімізують негативний вплив на навколишнє середовище.

Таким чином, наведені на схемі напрями модернізації формують комплексний підхід до вдосконалення конструкції та експлуатаційного сервісу циліндричних силосів, що забезпечує підвищення надійності обладнання, зниження експлуатаційних витрат, покращення умов зберігання продукції та підвищення економічної ефективності роботи агропромислових підприємств.

1.3. Конструктивні особливості циліндричних силосів

Характеристики листових конструкцій, до яких належать сталеві циліндричні силоси, визначають специфіку операцій складання та монтажу їхніх елементів.

У процесі виготовлення листових конструкцій силосів виконуються операції, не властиві для звичайних металоконструкцій, зокрема: фігурний розкрій листового прокату, вальцювання обичайок із листового металу та кілець із фасонного прокату, формування рулонних заготовок, штампування, відбортовка та механічна обробка кромки великогабаритних опуклих днищ тощо.

Оболонки силосів, сформовані з окремих листів, характеризуються значною протяжністю зварних швів, яка у 2–3 рази перевищує аналогічний показник для звичайних металоконструкцій у перерахунку на одиницю маси. До зварних з'єднань силосів висуваються підвищені вимоги, оскільки вони повинні забезпечувати не лише міцність, а й герметичність.

Стикове з'єднання елементів оболонок створює найкращі умови для економії металу, забезпечує оптимальну роботу конструкції та сприяє ефективному

контролю якості швів. Усі зварні з'єднання повинні виконуватися двостороннім зварюванням або одностороннім із проварюванням кореня шва чи із застосуванням підкладок за умови попередньої підготовки кромок.

При зведенні сталевих стін силосів, розміри яких не дозволяють виготовляти циліндричні обичайки в заводських умовах, доцільно застосовувати укрупнені елементи у вигляді кілець, сформованих методом рулоування, із мінімальною кількістю монтажних зварних швів. Для цього на підприємстві з окремих листів зварюють яруси, які надалі скручують у рулони на спеціалізованому обладнанні та транспортують до монтажного майданчика, де їх розгортають і встановлюють. Великогабаритні елементи конструкції силосів (рулоновані яруси корпусу, днища) укрупнюють до розмірів, що відповідають можливостям транспортних засобів і вантажопідймальності техніки.

Габарити полотнища, яке підлягає зварюванню та подальшому рулоуванню, визначаються з урахуванням раціонального членування всієї конструкції. Бічні стінки силосного корпусу формуються з кількох полотнищ, довжина кожного з яких дорівнює периметру оболонки. Ширина рулону відповідає висоті монтажного блока і визначається параметрами обладнання, раціональністю технологічного процесу та вантажопідймальністю монтажних механізмів. Схема розміщення листів у полотнищі та типи з'єднань обираються з урахуванням як конструктивних, так і технологічних вимог.

Через наявність кільцевих стиків між монтажними блоками вимоги до точності виготовлення рулонів і технології їх розгортання є більш жорсткими порівняно зі спорудженням вертикальних резервуарів і газгольдерів.

Під час влаштування покриття циліндричного силоса застосовують інший підхід, який передбачає виготовлення великогабаритних елементів у заводських умовах із подальшим виконанням механізованого зварювання на монтажному майданчику.

На етапі проектування силоса та технологічної підготовки виробництва доцільно: максимально скорочувати загальну довжину зварних швів, уникаючи трудомістких з'єднань; забезпечувати зручність складання та зварювання;

зменшувати кількість відправних і монтажних елементів; передбачати простоту встановлення конструкційних елементів, їх кріплення до вже змонтованих частин і швидкість вивірювання; включати до робочих креслень допоміжні пристрої для складання і стропування (вловлювачі, скоби тощо). Вибір типу складального оснащення здійснюється на основі економічного розрахунку з урахуванням його впливу на складові заводської собівартості.

Технічну експлуатацію сталевих силосів доцільно розглядати як сукупність заходів, спрямованих на забезпечення їх надійної та безвідмовної роботи протягом нормативного строку служби відповідно до проєктного призначення. До основних складових цього комплексу належать: періодичні огляди конструкцій для виявлення відхилень, дефектів і пошкоджень, що виникають у процесі експлуатації (рекомендована періодичність обстеження – один раз на 5 років [19]); контроль за недопущенням перевищення експлуатаційних навантажень порівняно з проєктними; моніторинг змін агресивності середовища; дотримання строків виконання поточних і капітальних ремонтів із забезпеченням належного контролю якості; своєчасне та коректне ведення документації щодо всіх виконаних робіт, починаючи з введення об'єкта в експлуатацію.

У конструкціях силосів першочерговому контролю підлягають:

- стан покрівельного настилу та несучих оболонок;
 - цілісність зварних швів;
 - стан опорних і монтажних вузлів;
 - наявність і ступінь корозійних ушкоджень;
 - технічний стан вентиляційних люків.
- На основі результатів обстеження та перевірконого розрахунку визначається технічний стан конструкцій. Він класифікується за такими категоріями:
- працездатний – за наявності певних відхилень від нормативів і технічної документації забезпечується нормальна експлуатація в конкретних умовах;
 - обмежено працездатний – функціонування можливе за умови

впровадження спеціальних заходів контролю стану конструкцій, параметрів технологічного процесу та навантажень (інколи з обмеженням режимів роботи);

- непрацездатний (недопустимий) – стан конструкції відповідає одному з граничних станів за класифікацією [24] і не допускає подальшої експлуатації без підсилення.

Можливість використання силосів у різних технологічних комплексах як базового агрегату [25], який може виконувати різні функції шляхом дооснащення спеціальним обладнанням, зумовлює те, що фізичний знос конструкцій часто настає раніше морального. У зв'язку з цим виникає потреба у ремонті або підсиленні у разі встановлення обмежено працездатного чи непрацездатного стану. Необхідність таких заходів визначається: наявністю критичних дефектів і пошкоджень, що знижують міцність і жорсткість конструкції; впливом стихійних факторів; зміною умов експлуатації, пов'язаних зі зростанням навантажень, зміною розташування обладнання або інтенсифікацією технологічних процесів.

Підсилення елементів конструкцій може здійснюватися такими способами:

- використання резервів несучої здатності (обмеження режимів роботи обладнання або його заміна, зменшення кліматичних навантажень, наприклад, шляхом улаштування скатів для зниження снігових навантажень);

- збільшення площі поперечного перерізу відповідальних елементів (зокрема колон);

- встановлення накладок для перекриття локальних дефектів;

- монтаж додаткових ребер жорсткості в зоні стику оболонок;

- збільшення катета зварних швів.

Підсилення може виконуватися одним або кількома способами одночасно. Оптимальний варіант обирається на основі порівняльного аналізу з урахуванням економічних втрат від можливого порушення технологічного процесу, а також з огляду на технологічність і тривалість виконання робіт. З'єднання елементів підсилення з існуючими конструкціями виконують зварюванням. Матеріал для підсилення призначають відповідно до вимог ДБН [2], [3] з урахуванням механічних характеристик сталі існуючої конструкції.

1.4. Основні дефекти та пошкодження силосів

Під час експлуатації циліндричних силосів відбувається вплив значної кількості механічних, кліматичних, технологічних та експлуатаційних факторів, які можуть спричиняти виникнення дефектів і пошкоджень окремих конструктивних елементів. Поява дефектів призводить до зниження міцності, жорсткості та надійності споруди, погіршення умов зберігання продукції, збільшення витрат на обслуговування та ремонт, а також підвищення ризику виникнення аварійних ситуацій.

Дефекти конструкцій силосів прийнято поділяти на виробничі та експлуатаційні. До виробничих належать пошкодження, що виникають у процесі виготовлення, транспортування або монтажу конструкції. Експлуатаційні дефекти формуються внаслідок дії навантажень, впливу навколишнього середовища, порушення режимів роботи обладнання та недостатнього технічного обслуговування.

Основні причини виникнення дефектів силосів наведено на рисунку 1.10.



Рисунок 1.10 – Основні причини виникнення дефектів силосів

До найбільш поширених виробничих дефектів належать відхилення геометричних розмірів конструкції від проєктних значень; неякісне виконання зварних з'єднань; дефекти металопрокату; порушення технології виготовлення окремих елементів; помилки під час монтажу.

Однією з найбільш поширених проблем є дефекти зварних з'єднань. Низька якість зварювання може спричиняти утворення пор, тріщин, непроварів, підрізів, шлакових включень та інших пошкоджень. Такі дефекти створюють концентрацію локальних напружень та можуть стати причиною руйнування конструкції під дією циклічних навантажень.

Під час експлуатації найбільше навантаження сприймають стінки циліндричної оболонки, конічна воронка, кільця жорсткості та вузли з'єднання окремих елементів. У цих зонах найчастіше виникають деформації та пошкодження.

До основних експлуатаційних дефектів належать корозійні пошкодження; утворення тріщин; локальна втрата стійкості елементів; деформації оболонки; руйнування зварних швів; зношування внутрішньої поверхні конструкції; пошкодження опорних елементів; порушення роботи допоміжного обладнання.

Корозія є одним із найнебезпечніших факторів руйнування металевих силосів. Вона виникає внаслідок тривалого впливу вологи, температурних коливань, агресивних домішок у повітрі та конденсату, що утворюється на внутрішніх поверхнях конструкції. Поступове зменшення товщини металу призводить до зниження несучої здатності конструкції.

Розрізняють такі види корозії: суцільну; локальну; щілинну; електрохімічну; атмосферну.

Суцільна корозія проявляється рівномірним зменшенням товщини металу на всій поверхні. Локальна корозія характеризується утворенням окремих зон руйнування металу, які можуть стати джерелом появи тріщин.

Важливим видом пошкоджень є втрата стійкості стінок силоса. Під дією внутрішнього тиску зернової маси можуть виникати локальні деформації оболонки у вигляді хвилястості, вм'ятин або випучування поверхні.

Тріщини можуть виникати як у матеріалі конструкції, так і в зварних швах. Причинами їх утворення можуть бути циклічне навантаження при завантаженні та розвантаженні; концентрація напружень; температурні деформації; помилки під час проектування; дефекти виготовлення.

Особливо небезпечними є втомні тріщини, розвиток яких відбувається поступово під дією змінних навантажень. Такі пошкодження складно виявити на початкових стадіях без використання спеціальних методів діагностики.

Окремою групою є дефекти, пов'язані з порушенням роботи систем вентиляції, аерації та автоматичного контролю параметрів зберігання. Несправність вентиляційного обладнання або систем моніторингу може призводити до локального підвищення температури зернової маси, збільшення вологості та виникнення процесів самозгрівання продукції.



Рисунок 1.12 – Класифікація пошкоджень циліндричних силосів

Для своєчасного виявлення пошкоджень необхідно проводити періодичний контроль технічного стану силосів, який включає візуальний огляд конструкції; контроль геометричних параметрів; неруйнівний контроль зварних з'єднань;

визначення ступеня корозійного зношування; контроль стану систем автоматизації; перевірку працездатності допоміжного обладнання.

Таким чином, виникнення дефектів і пошкоджень у конструкціях циліндричних силосів безпосередньо впливає на надійність, безпечність та ефективність їх експлуатації. Використання сучасних методів технічної діагностики, планового сервісного обслуговування та конструктивної модернізації дозволяє знизити ризик аварійних ситуацій і підвищити термін служби обладнання.

Висновки до розділу 1

У результаті проведеного аналізу існуючих досліджень та сучасних конструктивних рішень циліндричних силосів встановлено, що силосні споруди є важливими елементами систем зберігання сільськогосподарської продукції та широко використовуються в зернопереробній, комбікормовій, борошномельній та інших галузях агропромислового комплексу. Їх застосування забезпечує зменшення втрат продукції, підвищення рівня механізації та автоматизації виробничих процесів, а також ефективне використання виробничих площ.

Проведений аналіз сучасних конструктивних рішень показав, що підвищення ефективності роботи циліндричних силосів досягається шляхом використання оцинкованих і високоміцних сталей, застосування ступінчастої зміни товщини оболонки, удосконалення конструкції днищ, використання ребер жорсткості, а також впровадження автоматизованих систем контролю параметрів зберігання продукції. Використання сучасних конструктивних рішень сприяє зменшенню матеріаломісткості конструкцій, підвищенню їх міцності та збільшенню терміну служби.

Встановлено, що конструктивні особливості циліндричних силосів обумовлюють специфічні вимоги до технології виготовлення, монтажу та

експлуатації. Значна протяжність зварних з'єднань, складність монтажних операцій та нерівномірність розподілу навантажень потребують застосування підвищених вимог до точності виготовлення та якості складання конструкцій.

Аналіз основних дефектів і пошкоджень показав, що найбільш поширеними є корозійні ушкодження, локальна втрата стійкості оболонки, деформації конструктивних елементів, руйнування зварних з'єднань та виникнення втомних тріщин. Значна частина пошкоджень виникає внаслідок порушення режимів експлуатації, недоліків проектування, дефектів виготовлення та недостатнього рівня технічного обслуговування.

Дослідження сучасних методів технічного обслуговування та сервісного забезпечення дозволило встановити, що підвищення надійності та довговічності силосів можливе шляхом впровадження систем автоматизованого моніторингу технічного стану, використання методів технічної діагностики та організації планово-попереджувального обслуговування.

Проведений аналіз дозволив визначити основні напрями подальших досліджень, які полягають в удосконаленні конструктивних рішень циліндричних силосів, зменшенні їх матеріаломісткості, підвищенні надійності конструкцій та вдосконаленні систем експлуатаційного сервісу, що буде розглянуто в наступних розділах роботи.

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

2.1. Теоретичні основи роботи циліндричних силосів

Ефективність функціонування циліндричних силосів значною мірою визначається умовами зберігання сипких сільськогосподарських матеріалів та фізичними процесами, які відбуваються всередині зернової маси. Під час зберігання продукція перебуває у складному середовищі, де одночасно протікають механічні, фізичні, теплообмінні, біологічні та аеродинамічні процеси. Їх інтенсивність залежить від фізико-механічних властивостей продукції, конструктивних параметрів силоса та режимів експлуатації.

Основним призначенням силосів є забезпечення тривалого зберігання зерна із мінімальними втратами маси та збереженням його технологічних характеристик. У процесі експлуатації силоса зернова маса перебуває під дією власної ваги, навантажень від вищерозташованих шарів, температурних коливань та змін вологості.

Під час зберігання у зерновій масі відбуваються теплообмінні процеси; масообмінні процеси; газообмін; механічне ущільнення; біологічні процеси; процеси внутрішнього переміщення вологи; зміна фізико-механічних властивостей продукції.

Схематично основні процеси, що відбуваються у зерновій масі під час зберігання, наведено на рисунку 2.1.

Зернова маса є складною багатокомпонентною системою, до складу якої входять зерно основної культури; органічні домішки; мінеральні домішки; повітря міжзернового простору; мікроорганізми.

Особливістю зернової маси є її пористість, яка визначає наявність міжзернових пор, заповнених повітрям.

Пористість зернової маси визначають як:

$$P = \frac{V_p}{V} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

де P – пористість зернової маси, %;

V_p – об'єм міжзернового простору;

V – загальний об'єм зернової маси.

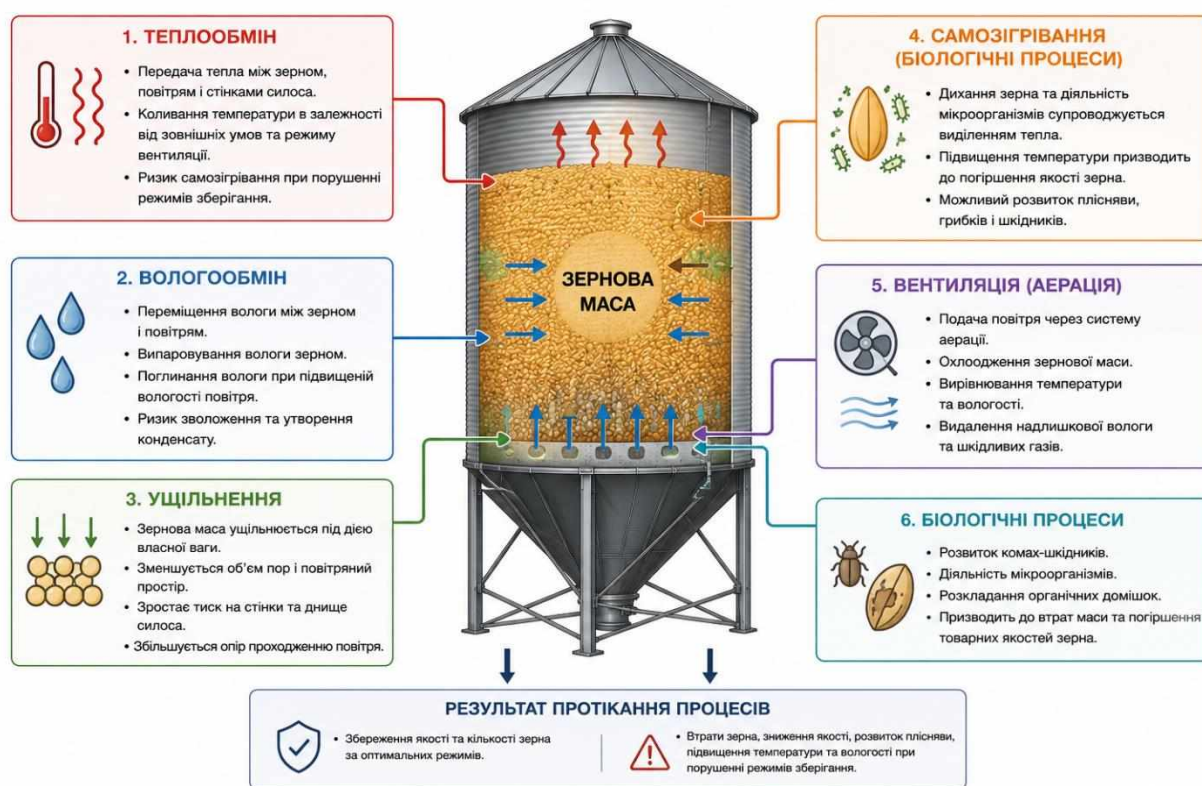


Рисунок 2.1 – Основні процеси, що відбуваються під час зберігання зернової маси в силосі

Величина пористості безпосередньо впливає на опір руху повітря; інтенсивність теплообміну; рівномірність сушіння; ефективність вентилявання.

Для більшості зернових культур пористість знаходиться в межах 40–55 %.

Зернова маса характеризується низькою теплопровідністю, що створює умови для локального накопичення тепла й утворення зон підвищеної температури.

Найважливішими факторами, що впливають на тривалість та якість зберігання продукції, є температура і вологість зерна.

Зі збільшенням вологості інтенсивність біохімічних процесів у зерні значно зростає. Підвищення вологості супроводжується збільшенням інтенсивності дихання зерна; розвитком мікроорганізмів; збільшенням тепловиділення; підвищенням ризику самозигрівання.

Інтенсивність процесів життєдіяльності зерна залежить від температури та вологості (рисунок 2.2).

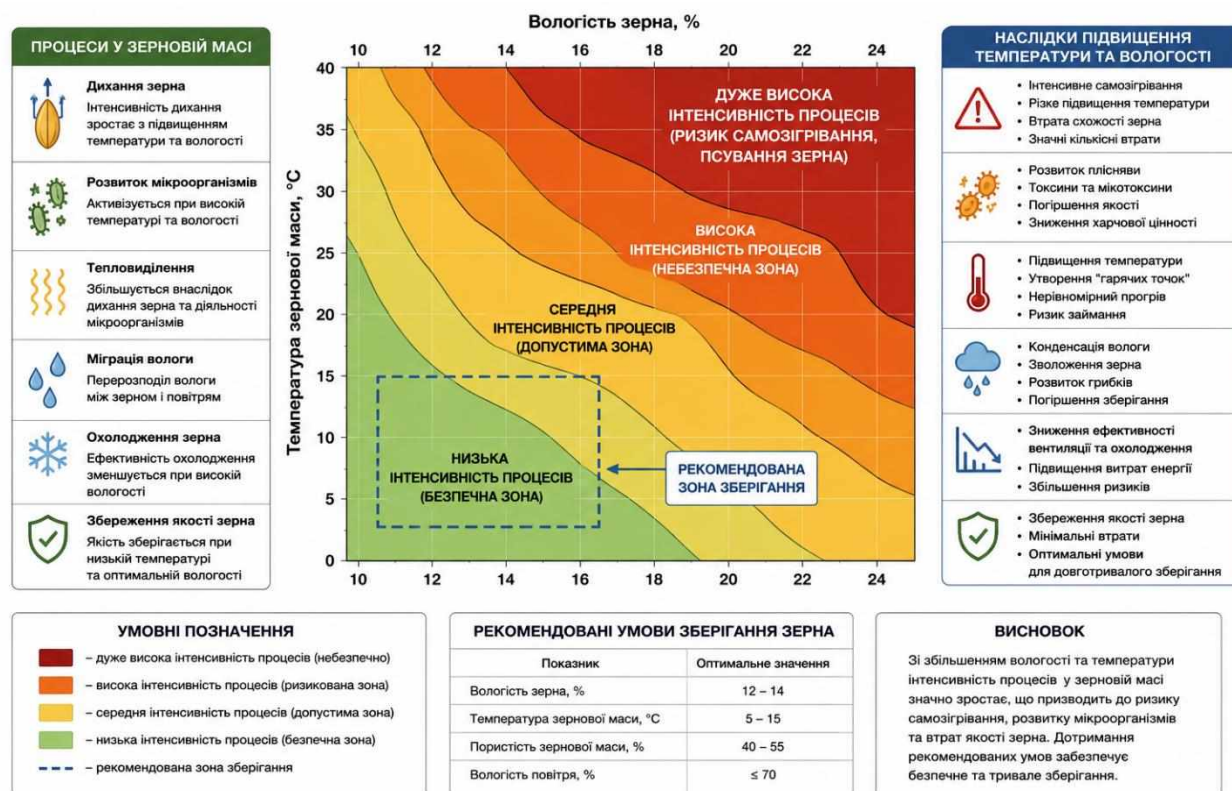


Рисунок 2.2 – Вплив температури та вологості на інтенсивність процесів у зернової масі

Для довготривалого зберігання зерна рекомендовані параметри становлять:

- вологість зерна – 12–14 %;
- температура зернової маси – 5–15 °C.

Підвищення температури понад 25–30 °C призводить до активізації біологічних процесів та створює умови для розвитку грибків і бактерій.

Під дією власної ваги зернова маса поступово ущільнюється. Найбільше ущільнення відбувається в нижніх шарах силоса через дію тиску верхніх шарів.

Ущільнення викликає зменшення міжзернового простору; збільшення опору руху повітря; зменшення ефективності вентиляції; збільшення тиску на стінки силоса.

Залежність тиску зернової маси від висоти шару описується законом Янсена:

$$p = \frac{\gamma p}{f k} \left(1 - e^{-\frac{f k y}{p}} \right) \quad (2.2)$$

де: γ – об'ємна вага зернової маси;
 ρ – гідравлічний радіус;
 f – коефіцієнт тертя зерна об стінку;
 k – коефіцієнт бокового тиску;
 u – глибина шару.

Для підтримання необхідних умов зберігання застосовується система активного вентиляювання (аерації).

Аерація – це процес примусової подачі повітря через шар зернової маси з метою охолодження продукції; вирівнювання температури; видалення надлишкової вологи; попередження самозігрівання.

Схему аерації силоса наведено на рисунку 2.3.

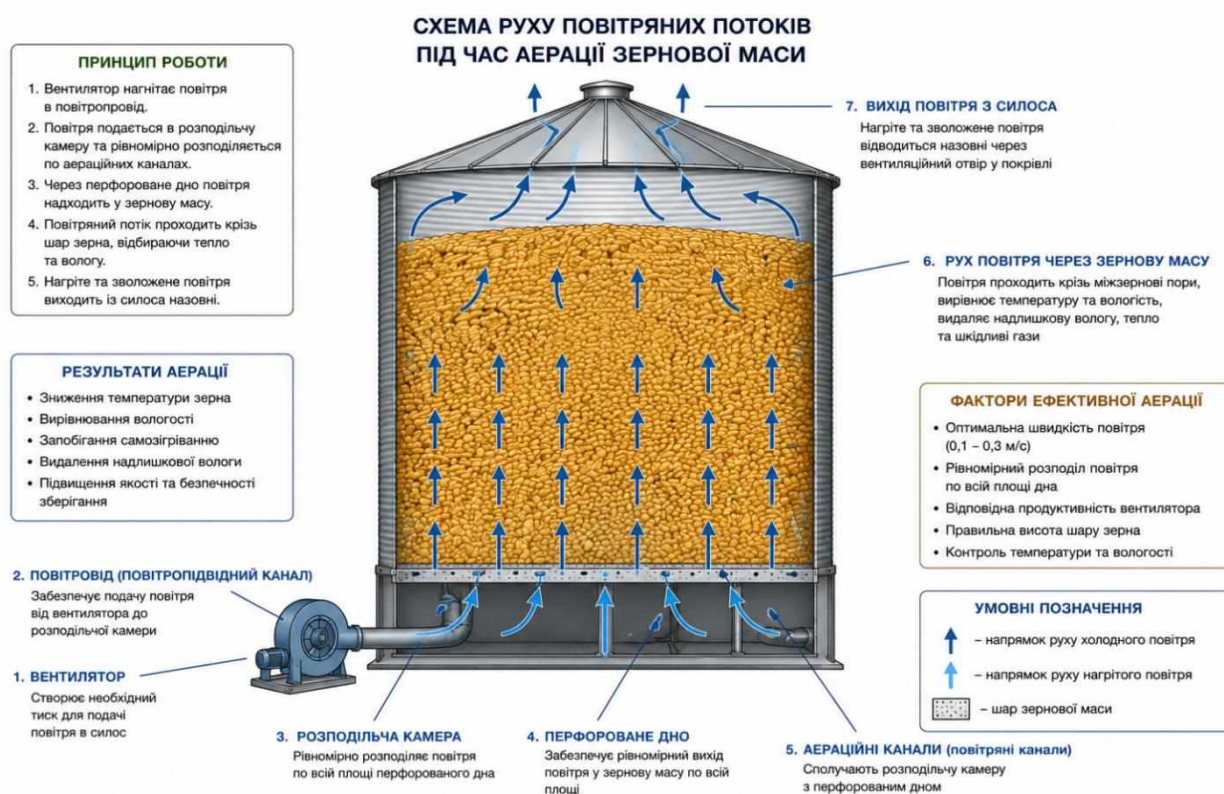


Рисунок 2.3 – Схема руху повітряних потоків під час аерації зернової маси

Ефективність аерації залежить від продуктивності вентилятора; швидкості руху повітря; висоти шару зерна; вологості продукції; температури навколишнього середовища.

Система вентиляції забезпечує стабілізацію параметрів внутрішнього середовища силоса та підтримання необхідного мікроклімату.

Правильно організована вентиляція забезпечує зниження температури зернової маси; зменшення вологості; попередження утворення конденсату; зниження ризику розвитку шкідників; підвищення терміну зберігання продукції.

Недостатня вентиляція або її нерівномірний розподіл можуть призводити до виникнення локальних зон підвищеної температури, що викликає процес самозігрівання.

Експлуатаційні режими силоса безпосередньо впливають на ефективність зберігання продукції.

До основних факторів належать швидкість завантаження та розвантаження; частота циклів роботи; режим роботи вентиляції; рівень заповнення силоса; технічний стан обладнання; періодичність технічного обслуговування.

Порушення режимів експлуатації може призводити до нерівномірного ущільнення зернової маси; виникнення склепінь; збільшення навантажень на конструкцію; погіршення якості продукції.

Таким чином, процеси, що відбуваються у зерновій масі під час зберігання, є взаємопов'язаними та суттєво впливають як на якість продукції, так і на умови роботи конструкції силоса. Для забезпечення ефективного функціонування систем зберігання необхідно підтримувати оптимальні параметри температури, вологості та вентиляції, а також забезпечувати належний режим експлуатації й технічного сервісу силосного обладнання.

2.2 Аналіз навантажень на конструкцію силоса

Сталеві силоси виконуються, як правило, круглої форми та проєктуються відповідно до вимог нормативних документів [2, 3].

Розрахунок сталевих конструкцій силосів на дію навантажень здійснюється за методом граничних станів [4], при якому конструкція вважається непридатною, якщо вона не відповідає встановленим експлуатаційним або монтажним вимогам.

До 1951 року металеві конструкції розраховувалися за методом допустимих напружень із використанням єдиного коефіцієнта запасу, що враховував змінність зовнішніх навантажень. У подальшому були впроваджені будівельні норми,

засновані на методі граничних станів, де застосовуються три основні коефіцієнти, значення яких визначено на основі методів математичної статистики. Їх різні комбінації дозволяють більш точно враховувати особливості роботи конструкцій. Отже, використання методу граничних станів забезпечує більш достовірне прогнозування надійності конструкцій.

Матеріали та з'єднання для несучих елементів силосів приймаються відповідно до вимог [4]. Для конструкцій, що експлуатуються при розрахунковій температурі вище мінус 30°C, застосовують сталі загального призначення відповідних марок. У районах із температурою мінус 40°C і нижче доцільно використовувати низьколеговані сталі для підвищення надійності конструкцій.

На початковому етапі проектування силосів визначають їх основні геометричні параметри, які повинні відповідати ряду умов. До них належать: відповідність об'єму силоса необхідному обсягу матеріалу; відсутність затримки руху частинок на похилих стінках конічної воронки; забезпечення вільного витікання матеріалу через розвантажувальний отвір (без утворення склепінь); досягнення заданої продуктивності під час вивантаження.

Після цього визначають навантаження, що діють на конструкцію, та виконують розрахунок напружень у її елементах.

Стінка циліндричного корпусу є основним несучим елементом силоса і розраховується за методом граничних станів відповідно до вимог [2], [3]. Товщина стінок зазвичай приймається сталюю по висоті та задається директивно, що призводить до надлишкового запасу міцності і стійкості (особливо у верхній частині оболонки) та, як наслідок, до підвищеної витрати матеріалів ([5]).

Під час розрахунку силосів необхідно враховувати навантаження від тиску сипкого матеріалу, власної ваги конструкцій і технологічного обладнання з урахуванням динамічних факторів, а також снігові, вітрові, тимчасові навантаження на перекриття та сейсмічні впливи. Додатково виконується перевірка стійкості гладких циліндричних стінок. Також враховуються локальні напруження, пов'язані з крайовим ефектом у зонах з'єднання оболонок і їх защемлення біля кільця жорсткості.

Тиск на стінки і днище силоса тим більший, чим менше внутрішнє тертя

сипкого матеріалу. Значення коефіцієнта внутрішнього тертя може суттєво змінюватися навіть для одного матеріалу залежно від його пористості, вологості та інших чинників. У силосах маса матеріалу значно ущільнюється в поперечному напрямку, що призводить до зростання тиску на стінки та сил тертя. Унаслідок цього на одиницю площі днища діє не вся маса матеріалу, оскільки частина навантаження передається на стінки через сили тертя. Тому в силосах спостерігається менший тиск на днище і більший – на стінки.

Згідно з [3] основні нормативні питомі тиски сипких матеріалів на днища і стінки силосів визначаються за відповідними формулами: (1)

$$p' = \frac{\gamma\rho}{fk} \left(1 - e^{-\frac{kx}{\rho}}\right)$$

$$p'' = kp'$$

де: p' , p'' – основні нормативні значення вертикального та горизонтального тиску сипкого матеріалу в силосі на глибині x від поверхні засипки до розглядуваного перерізу (рисунок 4);

f – коефіцієнт тертя матеріалу об стінку;

k – коефіцієнт бокового тиску;

ρ – гідравлічний радіус поперечного перерізу.

Для цих позначень використовується формула гідравлічного радіуса поперечного перерізу силоса:

$$\rho = \frac{A}{b} \quad (2.3)$$

де: A – площа поперечного перерізу силоса;

b – периметр поперечного перерізу силоса.

Формула для визначення питомого нормативного тиску на горизонтальні перерізи діаметра B має вигляд:

$$p_{\Gamma} = k p_{\text{В}} \quad (2.4)$$

де: p_{Γ} – нормативний горизонтальний питомий тиск сипкого матеріалу;

k – коефіцієнт бокового тиску;

$p_{\text{В}}$ – нормативний вертикальний питомий тиск сипкого матеріалу.

Циліндричні стінки силосів розраховують на розтяг під дією навантаження, спрямованого перпендикулярно до поверхні оболонки.

Окрім основного навантаження від засипки, враховується додатковий вплив, що виникає під час завантаження, розвантаження та інших технологічних операцій [2]. Його врахування здійснюється шляхом введення коефіцієнта α поряд із коефіцієнтами перевантаження n і умов роботи m у межах розрахунку за методом граничних станів.

Кільцеві зусилля M_θ на одиницю довжини перерізу вздовж твірної визначаються за формулою:

$$M_\theta = \alpha n m p_r R \quad (2.5)$$

де: α – коефіцієнт місцевих напружень;

n – коефіцієнт перевантаження;

m – коефіцієнт умов роботи.

Стійкість циліндричних стінок силосів перевіряють з урахуванням стискаючих зусиль, спричинених вагою засипаного матеріалу, за відповідною залежністю:

У зоні з'єднання циліндричної частини з конічною вертикальне навантаження від засипки визначатиметься так:

Вертикальне навантаження від засипки у місці з'єднання циліндричної та конічної частин силоса визначається за формулою:

$$P_B = \gamma V \quad (2.6)$$

де V – загальний об'єм засипки силоса, що визначається за залежністю:

$$V = \frac{\pi D^2 H}{4} + \frac{\pi h}{12} (d^2 + dD + D^2) \quad (2.7)$$

де D – внутрішній діаметр циліндричної частини силоса;

H – висота циліндричної частини;

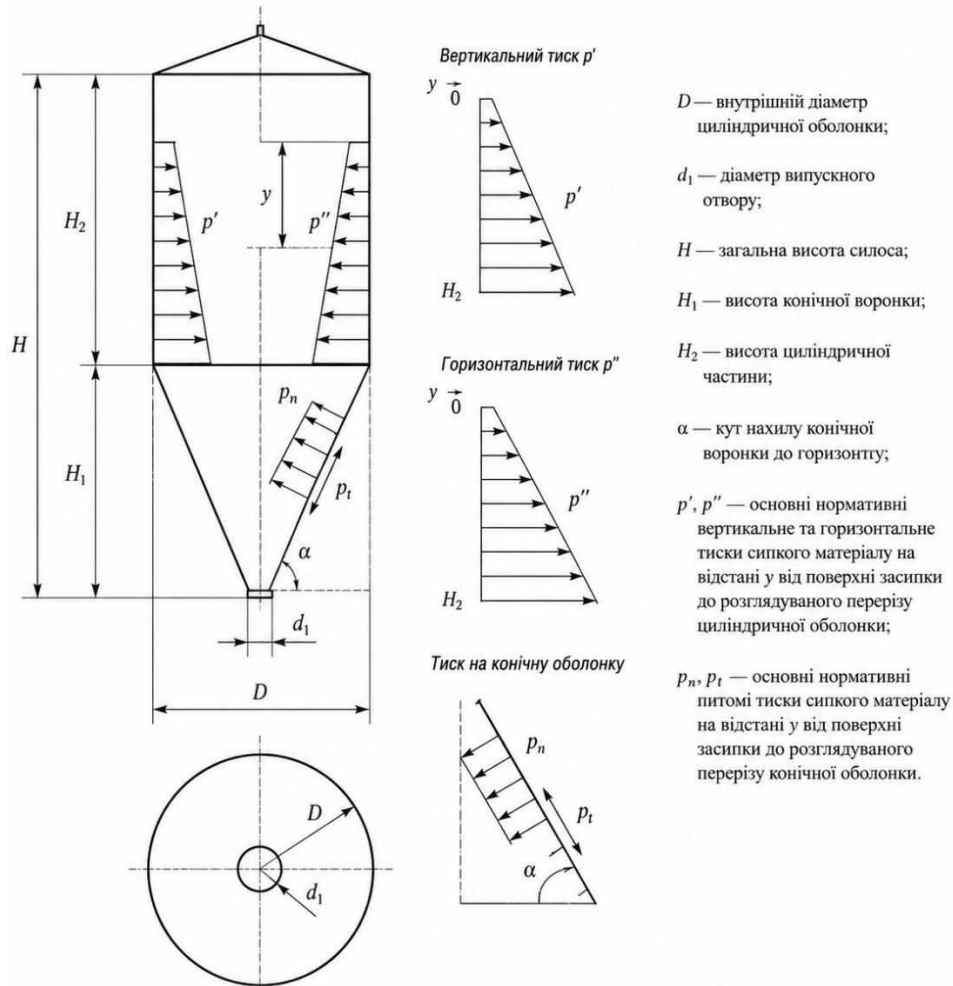
h – висота конічної воронки;

d – діаметр випускного отвору.

За умови наявності в зоні стику оболонок кільця жорсткості стискаюче

зусилля в ньому визначається за формулою:

$$N_K = P_B \operatorname{ctg} \alpha \quad (2.8)$$



D — внутрішній діаметр циліндричної оболонки; d_1 — діаметр випускного отвору; H — загальна висота силоса; H_1 — висота конічної воронки; H_2 — висота циліндричної частини; α — кут нахилу конічної воронки до горизонту; p', p'' — основні нормативні вертикальне та горизонтальне тиски сипкого матеріалу на відстані y від поверхні засипки до розглядуваного перерізу циліндричної оболонки; p_n, p_t — основні нормативні питомі тиски сипкого матеріалу на відстані y від поверхні засипки до розглядуваного перерізу конічної оболонки)

Рисунок 2.4 - Схема силоса з навантаженнями.

Конічні стінки воронки силоса підлягають розрахунку на розтяг у двох напрямках: кільцевому та меридіональному.

Основне нормативне питоме навантаження сипкого матеріалу, що діє перпендикулярно до похилої поверхні днища силоса p_n , визначається за формулою:

$$p_n = p' \cdot m_0 \quad (2.9)$$

де m_0 – коефіцієнт, що використовується в методиці розрахунку за граничними станами.

Основне нормативне навантаження сипкого матеріалу, спрямоване дотично до похилої поверхні днища p'' , яке передається через сили тертя, визначається за формулою:

$$p_t'' = p' \cdot m_0' \quad (2.10)$$

де m_0' – коефіцієнт, що застосовується в методиці розрахунку за граничними станами.

Розтягувальне зусилля в конічній оболонці у кільцевому напрямку визначається за формулою:

$$N_k = \frac{p_n B_1}{2 \sin \alpha} \quad (2.10)$$

де B_1 – діаметр воронки у розглядуваному перерізі.

α – кут нахилу конічної воронки до горизонту.

Розтягувальне зусилля конічної оболонки вздовж твірної визначається так:

$$(2.11)$$

де Q_B – маса частини всередині конічної оболонки, розташованої нижче розглядуваного перерізу;

P_B – вертикальне навантаження від засипки на глибині H , що визначається за формулою:

$$P_B = p \pi r^2 \quad (2.12)$$

де

$$V_1 = \pi r^2 y + \frac{\pi h}{12} (d^2 + dD + D^2) \quad (2.13)$$

де r – радіус циліндричної частини силоса;

y – глибина розглядуваного перерізу;

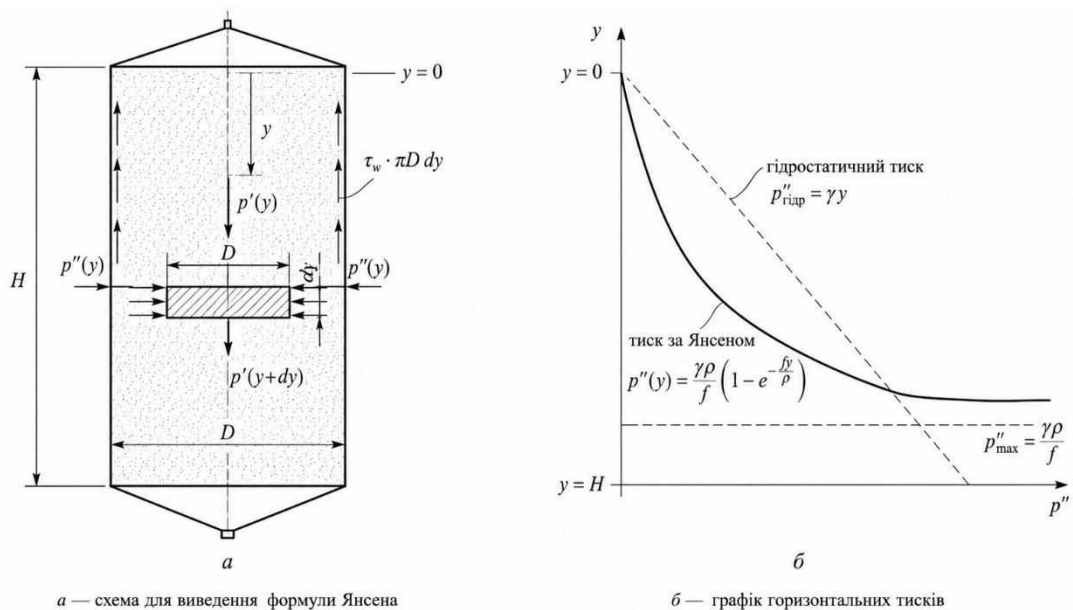
h – висота конічної частини;

d – діаметр випускного отвору;

D – внутрішній діаметр циліндричної оболонки силоса.

Під час проектування корпусів циліндричних силосів відповідно до вимог ДБН визначальними величинами є нормативні питомі тиски сипких матеріалів на конічні днища та циліндричні стінки. Формули, що застосовуються нині для визначення цих навантажень, ґрунтуються на експериментальних дослідженнях Янсена та запропонованій ним теорії розподілу тиску зернової маси в силосах.

Виведення формул Янсена базується на аналізі умов рівноваги елементарного горизонтального шару сипкого матеріалу, на який діють навантаження зверху і знизу, власна вага та сили тертя об стінки силоса (рисунок 5).



а — схема для виведення формули Янсена

б — графік горизонтальних тисків

Рисунок 5 - Розрахункова схема тисків сипкого матеріалу в силосі за Янсенем.

а – схема для виведення формули Янсена; б – графік горизонтальних тисків

Рисунок 2.5 - Розрахункова схема тисків сипкого матеріалу в силосі за Янсенем.

Рисунок 5 відображає розрахункову схему визначення тиску сипкого матеріалу в силосі відповідно до теорії Янсена, яка є основою для оцінки навантажень на стінки та днище силосних конструкцій. Дана теорія ґрунтується на аналізі рівноваги елементарного шару сипкого матеріалу в межах силоса з урахуванням дії власної ваги матеріалу, вертикального навантаження, горизонтального тиску та сил тертя між матеріалом і внутрішньою поверхнею стінок.

На рисунку 5, а наведено розрахункову схему для виведення формули Янсена. Розглядається елементарний шар матеріалу товщиною $dydydy$, розташований на глибині $ууу$ від поверхні засипки. На цей шар діють вертикальний тиск зверху та знизу, власна вага матеріалу, а також сили тертя, які виникають на контакті зі стінками силоса. Сили тертя частково компенсують навантаження від маси зернового стовпа, що призводить до зменшення вертикального навантаження на днище та збільшення навантаження на стінки конструкції.

На рисунку 5, б наведено графічну залежність зміни горизонтального тиску по висоті силоса. На відміну від гідростатичного закону, де тиск збільшується лінійно із глибиною, за теорією Янсена його зростання відбувається нелінійно. При збільшенні висоти шару матеріалу інтенсивність наростання тиску поступово зменшується та наближається до граничного значення. Це пояснюється впливом сил тертя між зерною масою і стінками силоса.

Основне рівняння Янсена для визначення вертикального тиску має вигляд:

$$p' = \frac{\gamma\rho}{fk} \left(1 - e^{-\frac{ky}{\rho}}\right) \quad (2.14)$$

де: p' – вертикальний тиск сипкого матеріалу на глибині $ууу$;

γ – питома вага сипкого матеріалу;

ρ – гідравлічний радіус поперечного перерізу силоса;

f – коефіцієнт тертя матеріалу об стінки силоса;

k – коефіцієнт бокового тиску;

$у$ – глибина розглядуваного перерізу від поверхні засипки.

Горизонтальний тиск визначається залежністю:

$$p'' = k p' \quad (2.15)$$

де p'' – горизонтальний тиск сипкого матеріалу;

k – коефіцієнт бокового тиску.

Максимальне значення горизонтального тиску становить:

$$p''_{max} = \frac{\gamma\rho}{f} \quad (2.16)$$

Отримані залежності широко застосовуються при проектуванні циліндричних силосів, оскільки дозволяють визначати розрахункові навантаження на конструктивні елементи споруди та виконувати оцінку міцності, жорсткості й стійкості конструкції. Для сучасних силосних систем ці розрахунки також використовуються при розробленні математичних моделей і систем автоматизованого проектування.

Тиск сипкого матеріалу на стінки конічної воронки силоса визначається за формулами, наведеними вище. Під час розрахунку зменшення площі поперечного перерізу в межах воронки не враховується, а визначення навантажень здійснюється з урахуванням повної глибини шару матеріалу від поверхні засипки до розрахункового перерізу. Якщо відомі значення тисків на дві взаємно перпендикулярні площини, можна визначити навантаження на будь-яку похилу поверхню, розташовану під кутом α до горизонтальної площини.

Нормальний тиск сипкого матеріалу на похилу поверхню днища або стінку конічної воронки визначається за залежністю:

$$p_a = p_B \cos^2 \alpha + p_T \sin^2 \alpha \quad (2.17)$$

або

$$p_a = p_B m_0$$

де:

$$m_0 = \cos^2 \alpha + k \sin^2 \alpha$$

m_0 – коефіцієнт, який враховує зміну тиску залежно від кута нахилу поверхні;
 α – кут нахилу поверхні днища або твірної конічної воронки до горизонтальної площини.

Дотичний тиск, який передається через сили тертя вздовж похилої поверхні, визначається за формулою:

$$p_t = p_a m'_0 \quad (2.18)$$

де:

$$m'_0 = (1 - k) \sin \alpha \cos \alpha$$

m_0' – коефіцієнт, що враховує вплив сил тертя між сипким матеріалом і поверхнею воронки.

Повне навантаження на похилу поверхню визначається як геометрична сума нормальної та дотичної складових:

$$P = \sqrt{p_a^2 + p_t^2} \quad (2.19)$$

Для силосів із відношенням висоти циліндричної частини до її діаметра $H/D > 1$ горизонтальний та вертикальний тиски тривалий час визначали за формулами Янсена. Цей підхід і сьогодні використовується для розрахунків силосних конструкцій, оскільки дозволяє достатньо точно оцінювати навантаження, що виникають під час зберігання сипких матеріалів.

Формули Янсена ґрунтуються на низці суттєвих припущень:

- величини горизонтального та вертикального тисків не залежать від внутрішнього зчеплення частинок сипкого матеріалу;
- властивості зернової маси в силосі розглядаються як характеристики ідеального сипкого середовища, однакові в будь-якій точці об'єму;
- рух матеріалу в силосі вважається рівномірним, а швидкості частинок однаковими по всьому горизонтальному перерізу;
- відсутні радіальні переміщення частинок, а тертя матеріалу об стінки по висоті приймається рівномірним;
- не враховується гранулометричний склад, а також вплив умов завантаження і розвантаження, вібрацій та струсів під час експлуатації.

Згідно з теорією Янсена, тиск на стінки пропорційний радіусу силоса. Якщо застосувати це положення до будь-якої умовно виділеної внутрішньої частини силоса, обмеженої коаксіальною циліндричною поверхнею меншого радіуса, виникає залежність тиску від радіальної координати. Це суперечить початковому припущенню про рівномірність напруженого стану по всьому горизонтальному перерізу. Отже, рекомендації щодо використання формули Янсена для силосів некруглого перерізу за умови рівномірного розподілу тиску по периметру є дискусійними.

Подальші дослідження показали значні відхилення між результатами за теорією Янсена і фактичними значеннями тисків у реальних ємностях. Експериментально встановлено, що максимальний вертикальний тиск виникає під час заповнення силоса, тоді як найбільші навантаження на стінки та максимальні сили тертя спостерігаються при одночасному завантаженні й вивантаженні (проточному режимі). У таких умовах вони можуть перевищувати значення, визначені за формулою Янсена, більш ніж у два рази [6].

Попри значну кількість теоретичних досліджень [6, 7, 8, 9, 10, 11] щодо тиску сипких матеріалів у ємностях, однозначного пояснення причин зростання тиску під час вивантаження досі не отримано.

С. Сафарян [6] запропонував враховувати збільшення тиску за допомогою поправочного коефіцієнта C_d (рисунок 6).

О. Таймер [12] також рекомендує враховувати підвищення тиску при розвантаженні відповідно до залежностей, наведених на рисунку 6.

Згідно з нормами DIN 1055, що діють у Німеччині, тиск на стінки та днища силосів визначається за формулами Янсена; при цьому максимальне навантаження на днище виникає під час заповнення, а на стінки – під час спорожнення. Норми DIN 1055 не встановлюють конкретних значень коефіцієнта тертя f сипкого матеріалу об стінки, а рекомендують визначати його через частку кута внутрішнього тертя залежно від крупності матеріалу та режиму роботи силоса (заповнення або спорожнення). Коефіцієнт бокового тиску також приймається різним для цих режимів. Найбільші додаткові тиски за німецькими нормами спостерігаються у верхній частині силоса.

Відповідно до вимог [3] підвищення тиску, що виникає під час спорожнення силоса та під впливом інших чинників, враховується за допомогою поправочного коефіцієнта α . Залежно від типу силоса та його розташування для відповідної ділянки стінки або днища вводиться коефіцієнт умов роботи m . Доцільно використовувати узагальнений коефіцієнт $\alpha_0 = \alpha \cdot m$, який застосовується при визначенні зусиль (аналогічно коефіцієнту динамічності).

Процес витікання сипких матеріалів із силосів часто порушується внаслідок утворення склепінь. Особливо чутливими до цього явища є матеріали з підвищеною

в'язкістю [3]. На основі досліджень [8], [10] встановлено три характерні типи витікання матеріалів різного ступеня зв'язності з бункерно-силосних ємностей:

I – вільне витікання малозв'язного сипкого матеріалу через розвантажувальний отвір діаметром d із формуванням потоку діаметром d_n ($d_n < d$), обваленням укосів у сформовану воронку та наявністю незначних залишків на днищі ємності (рисунок 7а);

II – витікання матеріалу з підвищеною зв'язністю, що супроводжується пульсаціями та утворенням динамічних склепін у зоні розвантаження (рисунок 7б). При $d < d_n$ витікання є нестійким, а зі збільшенням d_n виникає потреба у зовнішньому впливі;

III – відсутність гравітаційного витікання високозв'язного матеріалу через утворення статичних склепін при $d < d_n$ (рисунок 7в). У цьому випадку розвантаження здійснюється із застосуванням спеціальних пристроїв.

Як зазначено в роботі [13], визначальним чинником, що впливає на характер руху потоку, є фізико-механічні властивості матеріалу.

Порушення текучості матеріалу може призводити до низки негативних наслідків, зокрема втрат у виробництві, виникнення пожеж, псування продукції, пошкодження конструкцій і травмування персоналу. У великих силосах (місткістю понад 400–500 м³) вібрації під час розвантаження можуть спричинити втому матеріалу конструкції та її руйнування (за даними [14]). У працях [6], [7], [8] додатковий ефект вібрацій оболонки силоса під час завантаження, розвантаження та інших технологічних операцій пояснюється передусім характером витікання матеріалу та процесами склепінчастого утворення.

повинно виконуватися з використанням матеріалів, що відповідають вимогам до високоякісного фарбування згідно з ДСТУ 22753-77.

З метою запобігання конденсації вологи на внутрішніх поверхнях зовнішні стінки силосів, призначених для зберігання борошна та висівок, рекомендується теплоізолювати від зовнішнього середовища, зокрема шляхом розміщення силосів усередині будівель або влаштування спеціальних коридорів. Силоси для зерна, вбудовані в будівлі млинів, а також силоси для борошна у III і IV кліматичних районах допускається проектувати з суцільною теплоізоляцією зовнішніх стін відповідно до [3].

Регулювання процесу розвантаження може здійснюватися за допомогою сводообрушувачів, затворів і живильників.

У цілому, рівномірність і безперервність витікання матеріалу з ємностей значною мірою визначається такими чинниками:

- режимом роботи силоса, геометрією та конструктивними особливостями корпусу і розвантажувальної воронки;
- матеріалом футеровки;
- розташуванням і розмірами випускного отвору;
- фізико-механічними характеристиками матеріалу.

Урахування зазначених факторів здійснюється на етапі проектного розрахунку конструкції шляхом:

- вибору параметрів сипкого матеріалу відповідно до рекомендацій [2, 3];
- обґрунтування та прийняття оптимальних конструктивних рішень з урахуванням технології виготовлення, монтажу та параметрів виробничого процесу;
- підбору матеріалів футеровки внутрішніх поверхонь і розрахунку допоміжного обладнання (сводообрушувачів, затворів і живильників) для покращення умов витікання;
- формування рекомендацій щодо експлуатації силоса.

Таким чином, результати досліджень свідчать про складний характер процесів, що відбуваються під час руху сипких матеріалів у силосах. Експерименти, проведені переважно із зерном, дозволили зробити такі висновки:

- горизонтальний тиск матеріалу у стані спокою досить точно описується залежностями, запропонованими Янсенем;
- під час вивантаження матеріалу горизонтальний тиск зростає і досягає максимальних значень при усталеному русі потоку;
- рух матеріалу в середній частині силоса має виражений пульсуючий характер, причому частота пульсацій залежить від швидкості потоку;
- розподіл горизонтального тиску по поперечному перерізу визначається жорсткістю стінок: більшим жорсткостям відповідають вищі значення тиску.

2.3. Теоретичні основи напружено-деформованого стану конструкції

Завданням обстеження є виявлення відхилень фактичного стану конструкцій від проєктних рішень, стандартів і нормативних вимог. Розрізняють відхилення проєктних рішень і відхилення фактичного стану конструкцій. Перші визначаються як невідповідність прийнятих у проєкті конструктивних рішень сучасним нормам і вимогам.

Відхилення фактичного стану характеризуються розбіжностями з проєктними показниками, зокрема щодо просторового положення, геометричних параметрів, форми та цілісності конструкцій і їх елементів, якості, розмірів і розташування з'єднань, а також властивостей матеріалу.

Відхилення, що виникають на етапах виготовлення і монтажу, класифікують як дефекти, тоді як ті, що з'являються під впливом навантажень і умов експлуатації, відносять до пошкоджень. Дефекти поділяють за стадіями формування конструкції: дефекти прокату, дефекти виготовлення, дефекти транспортування і монтажу.

Пошкодження групують за причинами їх виникнення: від дії навантажень, температурних впливів, агресивного середовища, механічних ударів і наїздів транспортних засобів, їх характеристика описана в розділі 1.4.

Найбільш небезпечними дефектами для циліндричних силосів є втрата стійкості оболонки, руйнування зварних з'єднань, корозійні пошкодження та локальні деформації, оскільки вони призводять до концентрації напружень і можуть викликати аварійне руйнування конструкції.

наявними дефектами, так і в бездефектних елементах унаслідок невідповідності прийнятих розрахункових припущень реальним умовам роботи конструкцій.

З метою отримання необхідної інформації для оцінювання технічного стану та прийняття проектних рішень щодо ремонту або реконструкції виконують обстеження конструкцій, що перебувають в експлуатації.

Найбільш відповідальним і навантаженим елементом силоса є циліндрична оболонка, яка являє собою тонкостінну суцільну конструкцію, що виконує одночасно несучі та огорожувальні функції. Зношування сталевих листів, з яких вона сформована, внаслідок тертя сипкого матеріалу, динамічних навантажень під час експлуатації, а також корозійних процесів може призводити до втрати працездатності всієї споруди.

У разі, якщо за результатами обстеження виявлено дефекти або пошкодження (таблиці 2.1, 2.2) на циліндричних стінках і перевірочні розрахунки засвідчили непрацездатний стан конструкції, виконують відновлювальний ремонт.

Ремонт циліндричної обичайки здійснюється шляхом заміни окремих ярусів оболонки (при локальному зносі листів) або повної заміни корпусу.

Трудомісткість ремонтних робіт визначається витратами на виготовлення заготовок ярусів у заводських умовах, їх рулонування, транспортування до об'єкта та подальший монтаж.

Під час виготовлення елементів для ремонту виникають специфічні труднощі: значна частина деталей потребує індивідуального підгонювання за місцем встановлення; практично відсутня можливість проведення контрольної збірки на заводі.

Монтажні роботи при виконанні ремонту мають такі особливості:

- необхідність виконання робіт у діючому виробництві або за мінімальних зупинок ускладнює їх організацію як у просторі, так і в часі;

- операції носять розосереджений і часто одноразовий характер, доступ до місць виконання робіт обмежений, що ускладнює забезпечення безпеки під час зварювальних і складальних процесів;

- виникають додаткові операції, нехарактерні для монтажу нових конструкцій (демонтаж, правка, підсилення існуючих елементів), що потребує спеціальної

підготовки персоналу та оснащення.

Для оцінювання надійності обладнання необхідно враховувати вплив економічних витрат (матеріальних і трудових) та втрат, пов'язаних із простоем під час відновлення працездатності. Визначимо основні фактори наслідків відмов при експлуатації силосів сільськогосподарського призначення.

Відповідно до рекомендацій [33] силоси належать до другої групи машин за характером домінуючих факторів відмов. До цієї групи відносять обладнання, що працює у режимі, близькому до безперервного, коли проведення ремонтів під час експлуатації обмежене (зберігання і переробка зерна в періоди посівної та жнив). Основним фактором у цьому випадку є вимушений простій, економічні втрати від якого прямо залежать від його тривалості.

Для силоса, його вузлів і складових частин доцільно нормувати такі показники надійності:

- гамма-відсотковий ресурс (виріб, вузли, складові частини);
- середній ресурс (виріб, вузли, складові частини);
- середній строк служби (виріб);
- напрацювання на відмову (виріб, вузли);
- середня сумарна тривалість ремонтів (виріб, вузли);
- середній час відновлення (виріб, вузли);
- коефіцієнт готовності (виріб);
- коефіцієнт технічного використання (виріб).

Сформуємо структурну схему надійності виробу:



Рисунок 2.8 – Структурна схема надійності силоса.

Для оцінювання надійності елементів 1–3 структурної схеми використовують статистичні дані, отримані під час випробувань, експлуатації та аналізу відмов аналогічних оболонкових металоконструкцій (таблиці 1–2, [21], [22], [23]), тоді як розрахунок надійності елемента 4 виконують за довідковими матеріалами. Методика визначення надійності за довідковими даними полягає в наступному: відповідно до заданих умов експлуатації (температура, вологість, навантаження тощо) значення інтенсивності відмов, взяті з довідників, коригують множенням на коефіцієнт умов застосування K_y . Склад електрообладнання та контрольно-вимірювальної апаратури визначається технічним завданням.

Гамма-відсотковий ресурс — це напрацювання, протягом якого об'єкт із заданою ймовірністю γ не досягає граничного стану. Для сільськогосподарської техніки прийнято значення $\gamma = 80\%$. Нормативна довговічність виробу становить 16 років; для складових частин (електрообладнання, гідравлічні агрегати, засоби автоматизації) до першого капітального ремонту — 8000 мотогодин.

Середній строк служби силоса до списання — 25 років. Ресурси та строки

служби комплектуючих визначаються відповідно до їх паспортної документації.

Імовірність безвідмовної роботи виробу при безперервній експлуатації протягом 24 год повинна становити не менше 0,98.

Технічне обслуговування та підтримання працездатності силоса в польових умовах забезпечується силами обслуговуючого персоналу експлуатуючої організації із застосуванням засобів ЗІП.

Середнє напрацювання на відмову має бути не менше 1500 год.

Нормативи технічного обслуговування та ремонту силоса місткістю 100 м³: орієнтовна річна трудомісткість технічного обслуговування — 12 люд.-год; поточного ремонту — 176 люд.-год. Тривалість регламентних робіт, що виконуються після кожного року експлуатації, становить $T_p = 72$ год (за умови роботи $t = 6$ год на добу при п'ятиденному робочому тижні). Середня трудомісткість одного капітального ремонту — 680 люд.-год.

Коефіцієнт готовності K_r — це ймовірність того, що об'єкт буде працездатним у довільний момент часу, за винятком планових періодів, коли його використання не передбачається. Нормативне значення коефіцієнта готовності для нових розробок згідно з рекомендаціями [83] приймається $K_r = 0,98$.

2.4 Теоретичні засади вдосконалення сервісного забезпечення

Підвищення ефективності експлуатації циліндричних силосів залежить не лише від удосконалення конструктивних рішень, але й від організації системи технічного обслуговування та сервісного супроводу. У сучасних умовах розвитку агропромислового виробництва одним із найважливіших завдань є забезпечення високого рівня надійності обладнання, зменшення ризику виникнення аварійних ситуацій та підвищення ефективності використання ресурсів. Це обумовлює необхідність переходу від традиційних підходів технічного обслуговування до інтелектуальних систем сервісного забезпечення, заснованих на принципах прогнозування технічного стану та використанні цифрових технологій.

Технічний стан силоса є сукупністю параметрів, що характеризують працездатність конструкції та її окремих елементів у певний момент часу. У процесі

експлуатації конструкція піддається впливу різних факторів, серед яких найбільший вплив мають циклічні навантаження, корозійні процеси, температурні деформації, вібраційні впливи, а також зношування елементів конструкції.

Значна частина відмов силосів виникає поступово, тому ефективність експлуатації багато в чому залежить від своєчасного виявлення змін технічного стану конструкції та прогнозування розвитку пошкоджень.

Для оцінювання надійності силосів використовують структурну схему надійності, яка дозволяє встановити взаємозв'язок між окремими елементами конструкції та визначити вплив відмов окремих вузлів на працездатність системи в цілому.

До основних складових структурної схеми надійності силоса належать:

- циліндрична оболонка;
- конічна воронка;
- опорна система;
- завантажувальне обладнання;
- розвантажувальні механізми;
- системи вентиляції;
- системи контролю та автоматизації;
- електрообладнання.

Для оцінки надійності застосовуються основні показники:

- коефіцієнт готовності;
- імовірність безвідмовної роботи;
- середнє напрацювання на відмову;
- середній термін служби;
- середній час відновлення працездатності.

Коефіцієнт готовності характеризує ймовірність перебування системи у працездатному стані у довільний момент часу та визначається за залежністю:

$$K_g = \frac{T_p}{T_p + T_b} \quad (2.1)$$

де K_g — коефіцієнт готовності;

T_p — середній час безвідмовної роботи;

T_b — середній час відновлення.

Для сучасного обладнання значення коефіцієнта готовності зазвичай повинно становити не менше $K_z=0,95-0,98$.

Іншим важливим показником є середнє напрацювання на відмову, яке характеризує тривалість функціонування системи до появи першої відмови:

$$T = \frac{t}{n} \quad (2.2)$$

де T — середнє напрацювання на відмову;

t — загальний час роботи;

n — кількість відмов.

Прогнозування технічного стану передбачає визначення можливого моменту виникнення пошкоджень та залишкового ресурсу конструкції на основі результатів моніторингу.

Прогнозування ресурсу дозволяє зменшити кількість аварій; своєчасно планувати ремонтні роботи; скоротити витрати на технічне обслуговування; збільшити термін експлуатації обладнання.

Одним із важливих напрямів підвищення ефективності експлуатації силосів є оптимізація технічного обслуговування.

Традиційно система технічного обслуговування включає: планові огляди; поточний ремонт; капітальний ремонт; технічну діагностику; профілактичні заходи.

Періодичність проведення технічного обслуговування залежить від режимів експлуатації; типу продукції, що зберігається; умов навколишнього середовища; технічного стану конструкції; інтенсивності навантажень.

Поточний ремонт передбачає усунення незначних пошкоджень без припинення роботи обладнання. До його складу входять усунення локальних дефектів; відновлення антикорозійного покриття; ремонт зварних з'єднань; заміна окремих деталей.

Капітальний ремонт проводиться при значному погіршенні технічного стану та включає заміну окремих конструктивних елементів; підсилення конструкції; відновлення несучої здатності; модернізацію обладнання.

Оцінювання технічного стану конструкцій здійснюється за результатами візуального контролю; ультразвукової діагностики; вимірювання деформацій; аналізу корозійних пошкоджень; перевірочних розрахунків.

Сучасний розвиток інформаційних технологій сприяв широкому впровадженню цифрових систем у сфері технічного обслуговування силосів.

Одним із найважливіших напрямів є використання систем автоматизованого проектування (САПР), які дозволяють виконувати: розрахунок конструкції; моделювання напружено-деформованого стану; оптимізацію параметрів силоса; автоматичне формування конструкторської документації.

Використання автоматизованих систем значно скорочує час проектування та підвищує якість інженерних рішень.

Сучасні силоси також оснащуються системами автоматизованого моніторингу параметрів роботи.

Для цього використовуються: датчики температури; датчики вологості; датчики рівня заповнення; датчики деформації; вібраційні датчики; системи контролю роботи вентиляційного обладнання.

Схема автоматизованого моніторингу наведена на рисунку 2.10. Отримані дані передаються до центральної системи керування для подальшої обробки та аналізу.

Важливим напрямом розвитку є застосування технології Інтернету речей (IoT), яка забезпечує об'єднання окремих датчиків та обладнання в єдину інформаційну мережу.

Застосування IoT дозволяє здійснювати дистанційний контроль обладнання; виконувати безперервний моніторинг параметрів; автоматично формувати попередження про несправності; прогнозувати залишковий ресурс обладнання; зменшити витрати на експлуатацію.

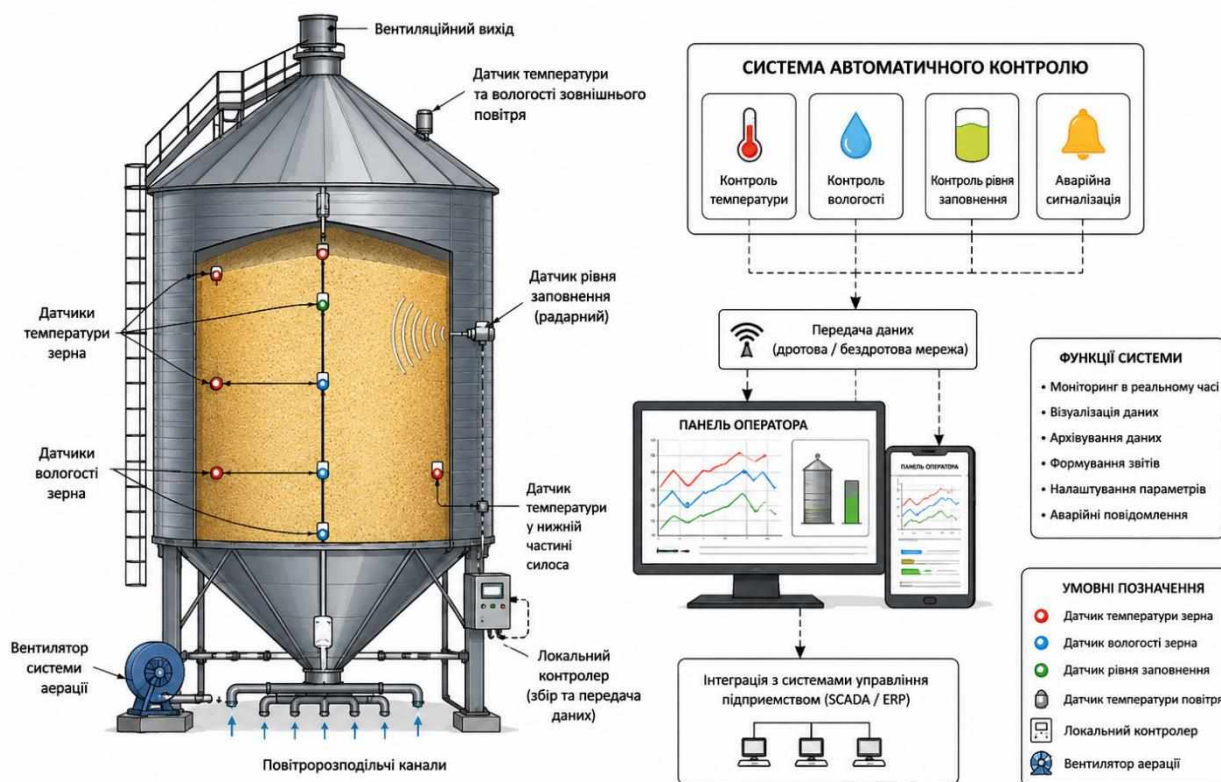


Рисунок 2.10 – Система автоматичного контролю температури, вологості та рівня заповнення силоса.

Використання систем віддаленого моніторингу забезпечує можливість контролювати роботу силосів через комп'ютери або мобільні пристрої в режимі реального часу.

Таким чином, удосконалення сервісного забезпечення циліндричних силосів має здійснюватися шляхом поєднання методів прогнозування технічного стану, оптимізації систем технічного обслуговування та використання сучасних цифрових технологій. Такий підхід дозволяє підвищити надійність конструкцій, збільшити термін їх експлуатації та знизити експлуатаційні витрати.

Висновки до розділу 2

Встановлено, що ефективність роботи циліндричних силосів значною мірою визначається умовами зберігання сипких матеріалів і сукупністю фізичних процесів, які відбуваються у зерновій масі. Основними з них є теплообмінні, масообмінні,

аеродинамічні, механічні та біологічні процеси, що безпосередньо впливають на якість продукції та умови функціонування конструкції.

Визначено, що найважливішими факторами забезпечення довготривалого зберігання продукції є підтримання оптимальних параметрів температури, вологості та вентиляції. Встановлено, що порушення режимів зберігання призводить до розвитку процесів самозігрівання, погіршення якості зернової маси та підвищення навантажень на конструкцію силоса.

Проведений аналіз закономірностей руху сипких матеріалів показав, що характер розподілу навантажень у силосі значною мірою залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу, геометричних параметрів конструкції та режимів завантаження й розвантаження.

Встановлено, що основними навантаженнями, які діють на конструкцію силоса, є навантаження від зернової маси, власної ваги конструкції, технологічного обладнання, а також вітрові, снігові та динамічні навантаження. Їх урахування є необхідною умовою забезпечення міцності, стійкості та надійності конструкції.

Аналіз існуючих теоретичних підходів до визначення тисків сипких матеріалів показав, що найбільш поширеним методом оцінки навантажень є використання залежностей Янсена. Разом із тим встановлено, що при завантаженні та розвантаженні силосів фактичні навантаження можуть перевищувати розрахункові значення, що потребує врахування додаткових коефіцієнтів та уточнених моделей розрахунку.

Встановлено, що найбільш навантаженим елементом конструкції є циліндрична оболонка, на яку припадає до 80–90 % загальної маси металоконструкції. Основними причинами зниження її працездатності є корозійні процеси, втомне руйнування матеріалу, локальні деформації та дефекти зварних з'єднань.

Визначено, що удосконалення конструкції силосів доцільно здійснювати шляхом оптимізації геометричних параметрів оболонки, застосування ступінчастої зміни товщини стінок, використання підсилювальних елементів та сучасних конструкційних матеріалів.

Встановлено, що використання високоміцних сталей, оцинкованих матеріалів, сучасних антикорозійних та композитних покриттів дозволяє підвищити довговічність конструкції, зменшити матеріаломісткість та знизити експлуатаційні витрати.

Аналіз систем технічного обслуговування показав, що ефективність експлуатації силосів значною мірою залежить від своєчасного контролю технічного стану, планування ремонтних заходів та оцінки показників надійності.

Встановлено, що перспективним напрямом удосконалення експлуатаційного сервісу є застосування цифрових технологій, автоматизованих систем моніторингу, САПР та технологій Інтернету речей (IoT), які забезпечують можливість безперервного контролю параметрів роботи обладнання, прогнозування ресурсу та зниження витрат на технічне обслуговування.

РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Програма та загальна схема досліджень

Метою проведення досліджень є обґрунтування конструктивних і сервісних рішень щодо модернізації циліндричних силосів для підвищення ефективності зберігання сільськогосподарської продукції шляхом удосконалення конструкції, підвищення надійності та покращення системи експлуатаційного сервісу.

Для досягнення поставленої мети розроблено програму досліджень, яка включає послідовне виконання комплексу теоретичних, аналітичних та розрахункових етапів.



Рисунок 3.1 – Загальна схема досліджень модернізації конструкції та експлуатаційного сервісу циліндричних силосів

Програма досліджень передбачає виконання таких основних завдань:

- проведення аналізу конструктивних особливостей сучасних циліндричних силосів;
- дослідження процесів зберігання сипких сільськогосподарських матеріалів;
- аналіз фізико-механічних характеристик зернової маси;

- визначення основних навантажень, що діють на конструкцію силоса;
- дослідження напружено-деформованого стану елементів конструкції;
- аналіз причин виникнення дефектів та пошкоджень металоконструкцій;
- обґрунтування шляхів зниження матеріаломісткості конструкції;
- дослідження можливостей використання сучасних матеріалів та конструктивних рішень;
- оцінювання показників надійності конструкції;
- аналіз сучасних методів технічного обслуговування та сервісного забезпечення;
- розроблення рекомендацій щодо вдосконалення системи експлуатаційного сервісу;
- оцінювання ефективності запропонованих заходів.

У процесі виконання роботи використовувалися методи аналізу наукової літератури та нормативної документації; методи теоретичної механіки та опору матеріалів; методи математичного моделювання; метод граничних станів; методи статистичної обробки результатів; методи техніко-економічного аналізу; методи комп'ютерного моделювання.

Дослідження виконувалися у декілька послідовних етапів.

На першому етапі проводився аналіз існуючих конструкцій силосів, особливостей їх експлуатації та сучасних напрямів модернізації.

На другому етапі досліджувалися процеси зберігання зернової маси, визначалися навантаження на конструкцію та аналізувався напружено-деформований стан силоса.

На третьому етапі виконувалося теоретичне обґрунтування модернізації конструкції, зокрема аналізувалися варіанти зниження матеріаломісткості, використання сучасних матеріалів і вдосконалення конструктивних вузлів.

На четвертому етапі проводилося дослідження систем технічного обслуговування та оцінювалися можливості використання автоматизованих систем контролю і цифрових технологій.

На завершальному етапі виконувалося оцінювання ефективності запропонованих рішень та формувалися практичні рекомендації щодо їх впровадження.

3.2 Методика дослідження напружено-деформованого стану конструкції

Дослідження напружено-деформованого стану конструкції циліндричного силоса проводилося з метою визначення розподілу напружень та деформацій у найбільш навантажених елементах конструкції під дією експлуатаційних навантажень.

При побудові розрахункової схеми конструкцію силоса поділено на окремі елементи: циліндричну оболонку, конічну розвантажувальну воронку, кільцеві ребра жорсткості, опорні колони та стикові вузли. Визначальним елементом при дослідженні НДС є циліндрична оболонка, яка сприймає основні навантаження від зернової маси та становить основну частину маси конструкції.

Математична модель включала геометричні характеристики конструкції, механічні властивості матеріалу та систему навантажень, що діють на силос у процесі експлуатації.

Виходячи з поняття оболонок та їх класифікації за такими ознаками:

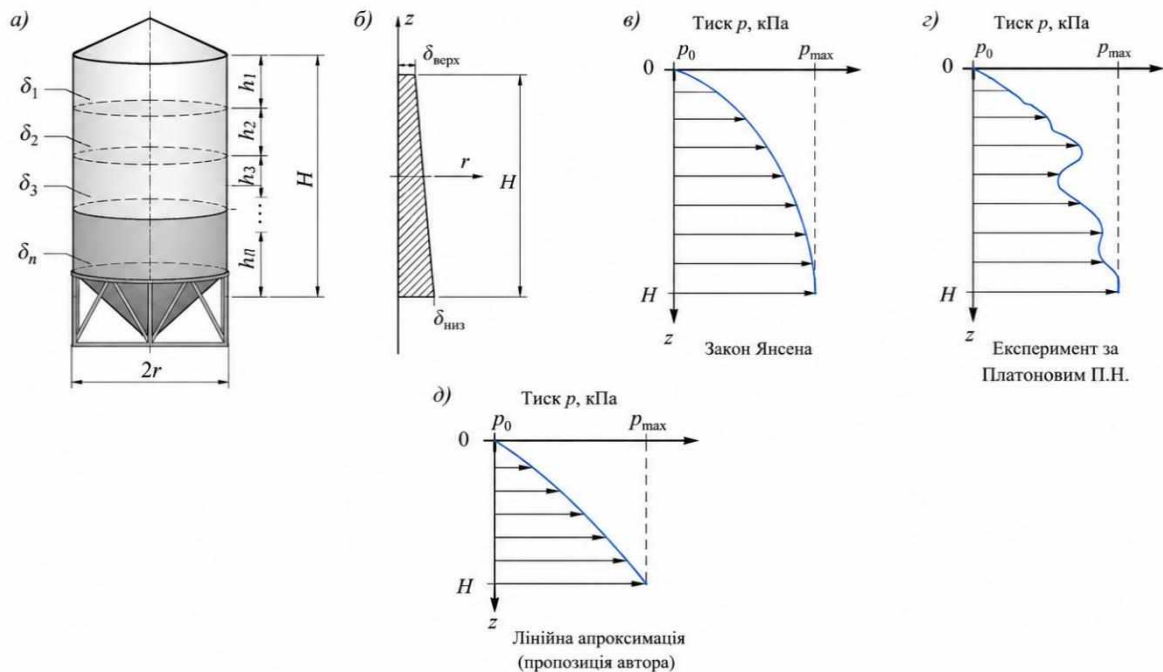
- характером геометричного формування конструктивної форми (гладкі, складчасті, комбіновані);
- типом кривизни (додатною, нульовою, від'ємною гаусовою кривиною);
- співвідношенням радіуса оболонки r до її товщини δ ($r/\delta < 20$ – товстостінна оболонка, $20 < r/\delta < 200$ – тонкостінна, $r/\delta > 200$ – надтонка);
- відношенням розрахункової довжини оболонки ℓ до її радіуса r ($\ell/r < 0,5$ – коротка, $0,5 < \ell/r < 10$ – середньої довжини, $\ell/r > 20$ – довга),
- циліндричну оболонку силоса слід класифікувати як гладку тонкостінну конструкцію середньої довжини, що перебуває у двовісному напруженому стані під дією зовнішніх навантажень.

Циліндричні силоси для зберігання сільськогосподарської продукції

належать переважно до тонкостінних оболонок середньої або великої довжини, що обумовлює необхідність врахування впливу локальних деформацій, крайових ефектів та втрати стійкості під дією експлуатаційних навантажень.

Під час розрахунку оболонки шуканими величинами є функції напружень і переміщень, зумовлені дією силових факторів (внутрішній тиск від засипки, власна вага конструкції, динамічні, вітрові та сейсмічні навантаження). Ці функції визначаються на основі рівнянь рівноваги, геометричних і фізичних співвідношень із урахуванням граничних умов.

У процесі математичного опису поведінки моделі часто виникає потреба у введенні додаткових спрощувальних припущень щодо окремих властивостей моделі та її матеріалу. У даному випадку задача дослідження НДС циліндричної обичайки формулюється в лінійній постановці, що передбачає розгляд малих переміщень, унаслідок чого вплив деформацій на зміну розрахункової моделі не враховується; окрім того, фізичні характеристики матеріалу приймаються сталими.



а – ескіз циліндричної оболонки зі ступінчасто-змінною товщиною сталевих листів; б – переріз стінки циліндричної оболонки з лінійно-змінною товщиною; в – етюра теоретичних тисків на стінку силоса за Янсенем; г – етюра експериментальних тисків на стінку силоса за Платоновим П.Н.; д – апроксимація тиску лінійним законом

Рисунок 3.2 - Зміна товщини обичайки та тиску на її стінки.

Розглянемо розв'язання задачі міцності тонкостінної циліндричної

оболонки силоса зі змінною товщиною стінок, яка зазнає дії змінних розподілених навантажень (за висотою).

Дослідження характеру зміни теоретичних і експериментальних значень тиску на стінки циліндричної частини силоса (рисунок 3.2, в, г), визначених відповідно за залежностями Янсена та експериментальними даними П.Н. Платонова, а також урахування динамічних складових навантаження, які виникають унаслідок вібрацій оболонки під час завантаження, розвантаження та виконання технологічних операцій, дозволяють виконати апроксимацію розподілу тиску по висоті силоса.

При цьому максимальне значення тиску спостерігається в зоні з'єднання циліндричної частини з днищем. Для спрощення подальших розрахунків розподіл внутрішнього тиску по висоті оболонки приймається таким, що змінюється за лінійним законом:

$$p(x) = p_0 \left(1 + \frac{ax}{R}\right) \quad (3.1)$$

де p_0 - початковий тиск у верхній частині стінки;

x - ордината висоти циліндричної стінки;

R - радіус серединної поверхні оболонки;

a - безрозмірний малий параметр.

Прийнята лінійна апроксимація дозволяє спростити математичний опис навантаження, забезпечуючи достатню точність визначення напружено-деформованого стану конструкції силоса під час подальших розрахунків.

З метою спрощення аналітичного розрахунку циліндричної оболонки та підвищення ефективності процесу її проєктування доцільно замінити ступінчасту зміну товщини стінки, яка визначається технологічними особливостями виготовлення конструкції, на еквівалентну лінійно-змінну залежність (рисунок 11, б).

Закон зміни товщини оболонки по висоті може бути представлений у вигляді:

$$\delta(x) = \delta_0 f(x) \quad (3.2)$$

де δ_0 – початкова товщина стінки оболонки;

$f(x)$ – функція зміни товщини по висоті конструкції.

$$f(x) = 1 + \alpha \left(\frac{x}{R}\right)^{k-1}$$

де α – безрозмірний параметр зміни товщини;

x – координата поточного перерізу по висоті оболонки;

R – радіус серединної поверхні оболонки;

k – довільний коефіцієнт, який визначається з умови рівності площ поздовжніх перерізів оболонки (рисунок 11, а, б).

Для визначення напружено-деформованого стану конструкції необхідно знайти функцію прогину оболонки $W(x)$.

При цьому для спрощення розрахунків вплив зміни радіуса серединної поверхні R на параметри напруженого стану при зміні товщини стінки не враховується.

Розв'язання задачі здійснюється шляхом мінімізації питомої внутрішньої енергії оболонки з урахуванням симетричності геометрії конструкції та характеру прикладеного навантаження:

$$D = \frac{E\delta^3}{12(1-\mu^2)} \quad (3.3)$$

де D – циліндрична жорсткість оболонки;

E – модуль пружності матеріалу (модуль Юнга);

μ – коефіцієнт Пуассона;

δ – товщина стінки оболонки.

У розрахунковій моделі також використовується кутова координата:

φ – кутова координата точки на поверхні оболонки.

Прийнятий підхід дозволяє отримати спрощену математичну модель циліндричної оболонки зі змінною товщиною та використовувати її для подальшого аналізу напружено-деформованого стану конструкції і пошуку раціональних параметрів силоса.

Для розв'язання задачі використовується рівняння Ейлера для варіаційної задачі:

$$\frac{\partial F}{\partial W} - \frac{d}{dx} \left(\frac{\partial F}{\partial W'} \right) + \frac{d^2}{dx^2} \left(\frac{\partial F}{\partial W''} \right) = 0 \quad (3.4)$$

У результаті застосування рівняння Ейлера отримують диференціальне рівняння вигину циліндричної оболонки:

$$D \frac{d^4 W(x)}{dx^4} + \frac{E\delta}{R^2} W(x) = p(x) \quad (3.5)$$

де $W(x)$ – функція прогину оболонки;

$p(x)$ – розподілене навантаження по висоті оболонки;

R – радіус серединної поверхні оболонки.

Граничні умови задачі записуються у вигляді:

$$\begin{aligned} W(x)|_{x=0} = W(x)|_{x=H} = 0 \\ \frac{d^2 W(x)}{dx^2} \Big|_{x=0} = \frac{d^2 W(x)}{dx^2} \Big|_{x=H} = 0 \end{aligned} \quad (3.6)$$

Наведені умови відповідають шарнірному закріпленню оболонки по торцях із крайовим кільцевим підкріпленням (шпангоутом).

Де H – висота циліндричної обичайки.

Такий підхід дозволяє отримати функцію прогину оболонки та визначити розподіл напружень і деформацій у конструкції силоса, що є необхідним для подальшої оцінки її міцності та обґрунтування параметрів модернізації.

Для верхньої частини силоса прийняті граничні умови є цілком обґрунтованими. Для нижньої частини конструкції їх застосування не є однозначним, оскільки друга похідна функції прогину при $x=H$ може набувати значень, відмінних від нуля.

Однак, відповідно до принципу Сен-Венана та експериментальних досліджень, наведених у роботі [37], зона крайового ефекту в місці з'єднання циліндричної оболонки з конічною частиною має обмежений характер і не здійснює суттєвого впливу на напружено-деформований стан верхньої частини силоса. Це пояснюється тим, що у верхніх зонах конструкції використовуються рулоновані листи меншої товщини, які сприймають менші навантаження.

При цьому вузол стикування циліндричної та конічної частин додатково перевіряється за стандартними методиками розрахунку відповідно до нормативних документів [2], [3], [4].

Після підстановки залежностей (3.5) та (3.6) у рівняння (3.7), а також після введення допоміжних параметрів отримується диференціальне рівняння, що описує напружено-деформований стан оболонки зі змінною товщиною:

$$A_1(x) \frac{d^4 W}{dx^4} + A_2(x) \frac{d^3 W}{dx^3} + A_3(x) \frac{d^2 W}{dx^2} + A_4(x) \frac{dW}{dx} + A_5(x) W = q(x) \quad (3.7)$$

де: $A_1(x)$, $A_2(x)$, $A_3(x)$, $A_4(x)$, $A_5(x)$ – коефіцієнти, що змінюються по висоті оболонки;

$W(x)$ – функція прогину;

$q(x)$ – функція зовнішнього навантаження.

Таким чином, математична модель напружено-деформованого стану циліндричної обичайки являє собою крайову задачу, сформовану системою диференціальних рівнянь та відповідними граничними умовами.

На сучасному етапі задачі такого типу розв'язуються переважно наближеними чисельними методами. Однак під час розв'язання крайових задач для оболонок змінної товщини при змінному характері розподіленого навантаження виникають змінні коефіцієнти при членах диференціальних рівнянь.

Наявність змінних коефіцієнтів істотно ускладнює отримання аналітичного розв'язку у замкненому вигляді та обмежує можливість безпосереднього використання класичних методів розрахунку.

У зв'язку з цим виникає необхідність застосування ефективних методів математичного моделювання та чисельного аналізу, що дозволяють визначити параметри напружено-деформованого стану конструкції з необхідною точністю та виконати подальшу оцінку ефективності запропонованої модернізації силоса.

Розрахунок конічної воронки силоса рекомендується виконувати на дію кільцевих та меридіональних розтягувальних зусиль відповідно до методики, наведеної у пункті 5.8 нормативного документа [4].

Тиск сипкого матеріалу в межах конічної частини силоса визначається за залежностями (3.1) та (3.2). Основні нормативні питомі тиски p' та p'' , що діють на поверхню конічної воронки, визначаються за формулами (3.8) і (3.9) відповідно до схеми навантаження, наведеної на рисунку 10.

Конічні стінки силоса розраховуються на дію розтягувальних зусиль у двох напрямках кільцевому напрямку – N_2 ; меридіональному напрямку – N_1 .

Розрахунок виконується за залежностями (3.8) і (3.9).

Необхідна товщина стінки конічної оболонки визначається за формулою:

$$\delta_{\text{тр}} = \frac{N_{\Sigma}}{\sigma_{\text{доп}} B_1} \quad (3.8)$$

де: $N_{\Sigma} = N_1 + N_2$ – сумарне навантаження, що діє на конічну оболонку;

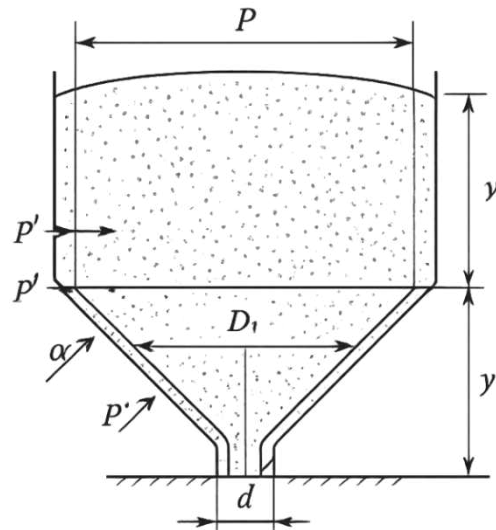
B_1 – діаметр воронки в розглянутому перерізі;

$\sigma_{\text{доп}}$ – допустиме напруження при розтягу матеріалу конструкції.

Наведена методика дозволяє визначити необхідні геометричні параметри конічної частини силоса та забезпечити її міцність і надійність під час експлуатації під дією навантажень від сипкого матеріалу.

Кут нахилу конічної воронки α призначають за [47] на $5-10^\circ$ більшим за кут природного укосу φ сипкого матеріалу для запобігання гальмуванню матеріалу під час витікання. У роботі [29] пропонується приймати $\alpha \approx 1,5\varphi$.

Діаметр випускного отвору d конічної воронки має бути достатнім для забезпечення необхідної пропускної здатності (продуктивності) силоса. Водночас розміри воронки повинні виключати утворення склепінь (зависання) матеріалу в силосі. З метою уникнення небезпеки раптового обвалення значних мас вантажу через отвір, а також надмірного ускладнення конструкції затворів, випускні отвори не повинні бути надто великими.



(P – внутрішній діаметр циліндричної оболонки; d – діаметр випускного отвору конічної воронки; α – кут нахилу конічної воронки до горизонту; D_1 – діаметр воронки на відстані y від поверхні вантажу до розглядуваного перерізу; p' , p'' – основні нормативні питомі тиски сипкого матеріалу на відстані y від поверхні вантажу до розглядуваного перерізу)

Рисунок 3.2 – Розрахункова схема конічної воронки

Для кускових сипких матеріалів із характерною крупністю шматків a_s найменший розмір випускного отвору силоса становитиме:

$$d \geq (4,0 \dots 5,5) a_{гр} \quad (3.9)$$

де $a_{гр}$ - характерна крупність шматків сипкого матеріалу.

Для дрібнокускових і порошкоподібних матеріалів розміри випускних отворів визначають залежно від пропускну здатності (продуктивності) силоса, але не менше 200–300 мм.

Колони призначені для передавання навантаження від власної маси конструкції силоса та засипки через фундамент на ґрунт.

Колона складається з трьох основних елементів: стержня, який виконує функцію основного несучого елемента; оголовка, що слугує опорою для основної конструкції; бази, яка забезпечує розподіл зосередженого навантаження від стержня по поверхні фундаменту.

Колону розраховують на міцність і стійкість. Вона має базу з жорстким защемленням, при цьому верхній кінець колони закріплений шарнірно.

На початковому етапі розрахунку задаються значенням коефіцієнта

поздовжнього вигину φ , який для стиснутих елементів має значення: $\varphi < 1$

За прийнятним значенням коефіцієнта φ визначається необхідна площа поперечного перерізу колони:

$$A_{\text{тр}} = \frac{N}{\varphi R n} \quad (3.10)$$

де $A_{\text{тр}}$ – необхідна площа поперечного перерізу колони;

N – розрахункове навантаження на колону;

φ – коефіцієнт поздовжнього вигину;

R – розрахунковий опір матеріалу колони;

n – коефіцієнт перевантаження, який застосовується в методиці розрахунку за граничними станами.

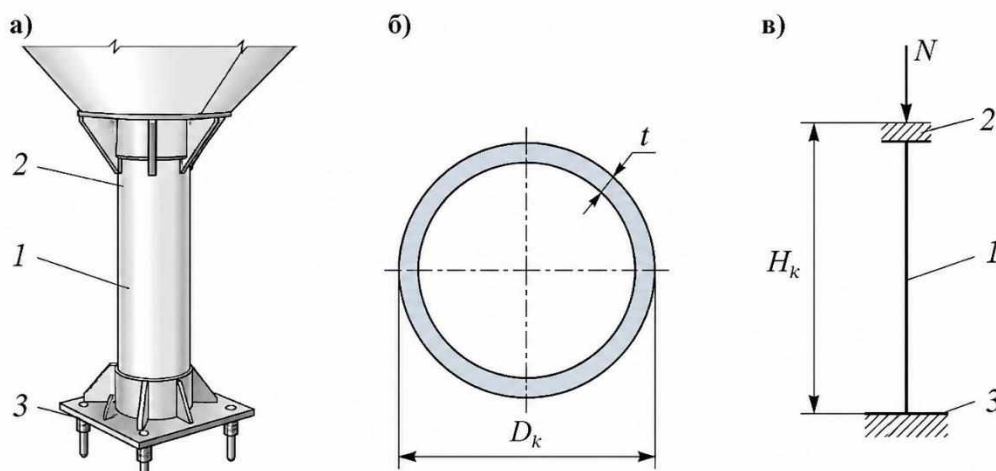
Після визначення необхідної площі поперечного перерізу виконується проектування колони та вибір профілю відповідно до сортаменту металопрокату.

Для вибраного перерізу визначають:

- мінімальний момент інерції I_{\min} ;
- мінімальний радіус інерції r_{\min} ;
- максимальну гнучкість λ_{\max} ;
- коефіцієнт поздовжнього вигину φ_2 , що відповідає отриманому значенню λ_{\max} .

значенню λ_{\max} .

Далі визначається напруження у спроектованому перерізі колони:



a – ескіз опорної колони силоса; б – поперечний переріз опорної колони; в – розрахункова схема опорної колони; 1 – стержень; 2 – оголовок; 3 – база; t – товщина стінки колони; D_k – зовнішній діаметр колони; H_k – висота колони; N – поздовжня сила

Рисунок 3.3 – Загальний вигляд і розрахункова схема опорних колон

Для інтенсифікації та підвищення якості розрахунку можливе створення на ПЕОМ алгоритму пошуку оптимального рішення на основі вибору параметрів і профілю за сортаментом за умови дотримання вимог міцності та стійкості колон.

Кільцевий шпангоут встановлюють у місці перетину конічної та циліндричної оболонок силоса для зменшення крайового ефекту. Кільце жорсткості являє собою шість зварних балок Г-подібного профілю, що спираються на колони в місцях стиків.

З огляду на симетрію геометрії та навантаження розрахунок виконується для одного прольоту кільцевого шпангоута, який розглядається як зварна балка з шарнірно опертими кінцями. Профіль має вигляд зварного нерівнополичного кутика. Розрахункова схема наведена на рисунку 15.

Процес проєктування кільцевого шпангоута формують як алгоритм оптимізації цільової функції: з умови мінімуму площі поперечного перерізу визначаються розміри кутика, що забезпечують виконання вимог міцності.

Конструювання балки розпочинають із визначення розрахункових зусиль M і Q . Найбільших значень поперечна сила досягає в опорних перерізах конструкції:

$$Q_A = Q_B = \frac{qL}{2} \quad (3.11)$$

де Q_A , Q_B – поперечні сили в опорах;

q – інтенсивність рівномірно розподіленого навантаження;

L – розрахункова довжина елемента.

Максимальний розрахунковий згинальний момент визначається за залежністю:

$$M_{max} = \frac{qL^2}{8} \quad (3.12)$$

де M_{max} – максимальний розрахунковий згинальний момент.

Розташування навантажень та прийняті позначення наведені на рисунку 3.4.

Далі визначається найменша необхідна висота балки з умови забезпечення її жорсткості при заданому допустимому напруженні $[\sigma]$ та

нормативних вимогах до жорсткості конструкції.

Необхідний момент опору балки $W_{\text{тр}}$ визначається за залежністю:

$$W_{\text{тр}} = \frac{M_{\text{max}}}{[\sigma]} \quad (3.13)$$

де: M_{max} – максимальний розрахунковий згинальний момент; $[\sigma]$ – допустиме напруження.

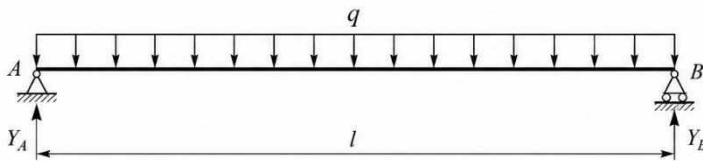
З іншого боку, момент опору W виражається через момент інерції поперечного перерізу I :

$$(3.14) \quad W = \frac{2I}{h}$$

де: I – момент інерції поперечного перерізу;

h – висота балки.

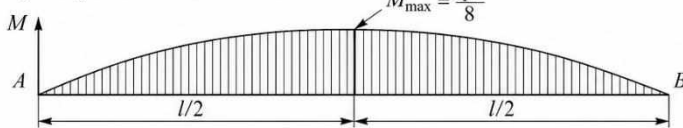
а) розрахункова схема



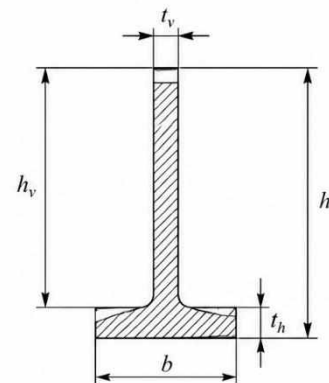
б) епюра поперечних сил



в) епюра згинальних моментів



в) поперечний переріз шпангоута



a – розрахункова схема; *б* – епюра поперечних сил; *в* – епюра згинальних – поперечний переріз шпангоута; *q* – рівномірно розподілене навантаження від ваги корпусу силоса із засипкою; *Q* – поперечна сила; *M* – згинальний момент; Y_a , Y_b – реакції опор *A* і *B* відповідно; *l* – довжина прольоту кільця жорсткості; t_v – товщина вертикального листа; t_h – товщина горизонтального листа; *h* – висота балки; h_v – висота вертикального листа балки; *b* – ширина горизонтальної полиці

Рисунок 3.4 - Розрахункова схема кільця жорсткості

Необхідна висота балки з умови жорсткості:

$$h = \frac{5[\sigma]_p l^2}{E[f]} \quad (3.15)$$

де h – необхідна висота балки;

$[\sigma]_p$ – допустиме розрахункове напруження;

l – довжина прольоту балки;

E – модуль пружності матеріалу;

$[f]$ – допустимий прогин балки.

Необхідна висота балки з умови найменшої маси за рекомендаціями [30] визначається за формулою:

$$h = (1,3 - 1,4) \sqrt{\frac{M}{\delta_b [\sigma]_p}} \quad (3.16)$$

де: M – розрахунковий згинальний момент балки;

δ_b – товщина вертикальної полки.

При проектуванні балки величина δ_b невідома, тому її первісно задаємо.

Із двох значень висоти h , визначених за формулами, побудованими з урахуванням вимог достатньої жорсткості (3.15) та міцності за умови мінімальної маси (3.16), приймають більше значення.

Далі підбирають розміри поперечного перерізу з урахуванням розрахункового згинального моменту M і висоти h .

Виконують перевірку напружень у вигнутій балці з урахуванням вимог забезпечення загальної стійкості:

$$\frac{\sigma}{\varphi \cdot [\sigma]} \leq 1 \quad (3.17)$$

де φ – коефіцієнт зниження допустимих напружень у балці з урахуванням забезпечення її стійкості.

Перевіряють елементи балки на забезпечення місцевої стійкості. Якщо умови забезпечення місцевої стійкості вертикального листа балки, наведені в розрахунках, не виконуються, необхідно передбачити встановлення вертикальних ребер жорсткості.

Конічний дах формується зі сталевих трапецієподібних секторів. Під час

монтажу один його кінець спирається на центральне опорне кільце, яке в цей період підтримується тимчасовою стійкою, а інший – на опорне кільце, розташоване по периметру стінки силоса відповідно до рисунка 16 а.

Несучими елементами щитових дахів є радіальні ребра у вигляді швелерів, які розраховуються за схемою трьохшарнірної арки, що складається з двох ребер діаметра, рівного діаметру циліндричного корпусу силоса.

Під час розрахунку даху враховують дві комбінації навантажень. Навантаження Q_1 , що діють на дах зверху вниз: власна вага конструкцій даху C_k , сніг S_c , вакуум $Q_{\text{вак}}$, що утворюється при витіканні сипкого матеріалу із силоса:

$$Q = C_k + S_c + Q_{\text{вак}} \quad (3.18)$$

де: $C_k = g_k \gamma_k$ – навантаження від власної ваги конструкції;

$S_c = s_0 c$ – снігове навантаження;

s_0 – нормативне значення навантаження від снігового покриву для місця будівництва, що приймається за [34];

c – коефіцієнт, що враховує характер розподілу снігу на даху силоса;

$Q_{\text{вак}} = q_{\text{вак}} \gamma_{\text{вак}}$ – навантаження від вакууму;

$q_{\text{вак}}$ – нормативне значення навантаження від вакууму;

$\gamma_k, \gamma_c, \gamma_{\text{вак}}$ – коефіцієнти надійності за навантаженням (вибираємо за [2]);

γ – коефіцієнт поєднання навантажень.

Навантаження Q_1 , що діють на дах знизу вгору: внутрішній надлишковий тиск у пароповітряному середовищі, вітрове відсмоктування, власна маса даху. Під час розрахунку за другою комбінацією вага даху віднімається з розрахункового навантаження, що діє знизу вгору.

$$Q_1 = (p_n \gamma_n + W_0 \gamma_0 c_0) - C_k \quad (3.19)$$

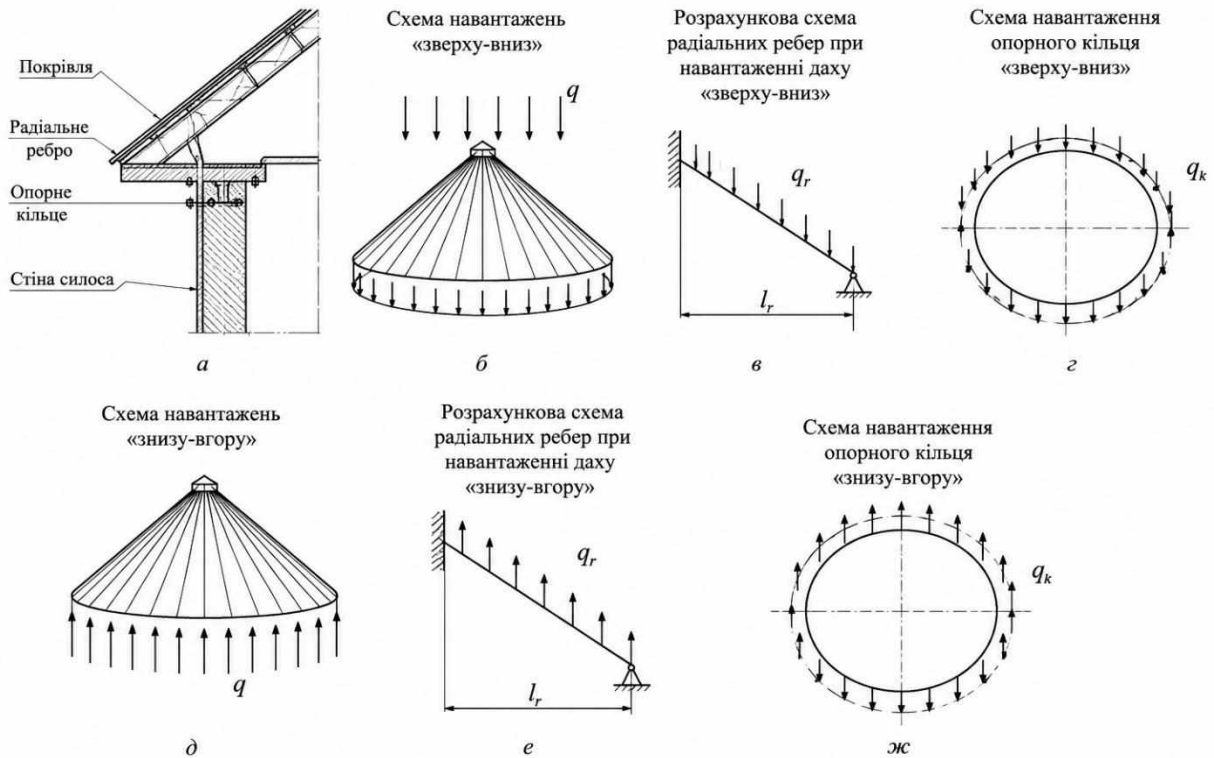
де W_0 – нормативний швидкісний напір, що приймається залежно від району будівництва;

p_n – внутрішній надлишковий тиск у пароповітряному середовищі;

c_0 – аеродинамічний коефіцієнт для даху;

γ_n, γ_0 – коефіцієнти надійності за навантаженням;

C_k – власна вага конструкції даху.



(а – ескіз стику даху зі стінкою силоса; б – схема навантажень «зверху-вниз»; в – розрахункова схема радіальних ребер при навантаженні даху «зверху-вниз»; г – схема навантаження опорного кільця «зверху-вниз»; д – схема навантажень «знизу-вгору»; е – розрахункова схема радіальних ребер при навантаженні даху «знизу-вгору»; ж – схема навантаження опорного кільця «знизу-вгору»)

Рисунок 3.5 – Загальний вигляд та схеми навантаження даху

Якщо $Q_1 < 0$, то розглядається тільки перша комбінація навантажень.

Після визначення опорних реакцій та зусиль у ребрах при кроці радіальних ребер b для комбінації навантажень Q_1 , задаються орієнтовним значенням висоти ребра h_p і виконують перевірку ребра на стійкість у стиснуто-згинальному стані за формулою:

$$\frac{N_{1 \max}}{\varphi_e A R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (3.20)$$

де $N_{1 \max}$ – максимальне розрахункове зусилля; A – площа поперечного перерізу ребра, прийнята з урахуванням висоти ребра h_p ; φ_e – коефіцієнт зниження розрахункового опору при позацентровому стиску; R_y – розрахунковий опір матеріалу за межею текучості; γ_c – коефіцієнт умов роботи.

У цьому випадку опорне кільце працює на розтяг і розраховується на міцність за формулою:

$$\sigma = \frac{N}{A_k} \leq R_y \gamma_c, \quad (3.21)$$

де N – розрахункове зусилля в опорному кільці;

A_k – площа поперечного перерізу кільця, що включає площу швелера та площу ділянки стінки

Аналогічно, при $Q_1 > 0$, розглядається друга комбінація навантажень. У цьому випадку радіальне ребро перебуває у розтягнуто-згинальному стані та перевіряється на міцність за залежністю:

$$\sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{W} \leq R_y \gamma_c, \quad (3.22)$$

За цієї комбінації навантажень опорне кільце перебуває у стиску і перевіряється на стійкість аналогічно кільцю жорсткості (пункт 3.5) на зусилля N_2 .

Попередньо задавшись відносним прогином настилу f/l , визначають геометричні характеристики ребер настилу з умов забезпечення вимог жорсткості та міцності.

Після виконання робіт із формалізації проектних рішень, тобто створення математичних моделей елементів конструкції, необхідно подати результати моделювання обраною мовою програмування з метою їх введення в ПЕОМ для проведення обчислювального експерименту відповідно до схеми на рисунку 16.

3.3 Методика оцінювання надійності та технічного стану

Дослідження математичної моделі, тобто отримання розв'язку диференціального рівняння за заданих граничних умов, може здійснюватися за допомогою методу скінченних елементів, методу скінченних різниць, методу малого параметра та інших підходів.

Вибір способу дослідження математичної моделі визначає стійкість алгоритму, тобто чутливість отриманого результату до неминучих похибок

числових обчислень.

Виходячи з вимог практичної реалізації чисельних методів, до них висувають дві основні групи вимог. Перша пов'язана з адекватністю дискретної моделі вихідній математичній задачі, друга – з доступністю та ефективністю її реалізації на ПЕОМ.

До першої групи належать такі критерії, як збіжність чисельного методу, виконання дискретних аналогів законів збереження, а також якісно коректна поведінка розв'язку дискретної задачі. Детальний аналіз цих вимог наведено в [38], [39].

Припустимо, що дискретна модель математичної задачі подана у вигляді системи великої, але скінченної кількості алгебраїчних рівнянь. Зазвичай підвищення точності розв'язку потребує збільшення їх кількості. Чисельний метод вважається збіжним, якщо зі зростанням числа рівнянь розв'язок дискретної задачі наближається до розв'язку вихідної задачі [38]. Оскільки ПЕОМ оперує лише скінченною кількістю рівнянь, у практичних умовах повної збіжності, як правило, не досягають. Тому важливо вміти оцінювати похибку методу залежно від кількості рівнянь дискретної моделі та формувати її таким чином, щоб вона адекватно відображала якісну поведінку розв'язку навіть при відносно невеликій кількості рівнянь.

Як приклад, дискретною моделлю задач механіки може бути різницева схема. Для її побудови область зміни незалежних змінних замінюється дискретною множиною точок – сіткою, а похідні, що входять до вихідного рівняння, апроксимуються скінченно-різницеvими співвідношеннями. У результаті формується система алгебраїчних рівнянь відносно значень шуканої функції у вузлах сітки. Кількість рівнянь у такій системі дорівнює числу вузлів.

Збіжність чисельного методу тісно пов'язана з його коректністю.

Припустимо, що вихідна математична задача є коректно поставленою, тобто її розв'язок існує, єдиний і безперервно залежить від вхідних даних. У такому разі дискретну модель необхідно будувати так, щоб ці властивості зберігалися. Отже, поняття коректності чисельного методу включає

однозначність розв'язку відповідної системи рівнянь та його стійкість щодо вхідних даних. Під стійкістю розуміють безперервну залежність розв'язку від вхідних параметрів, рівномірну за кількістю рівнянь дискретної моделі.

Друга група вимог до чисельних методів пов'язана з можливістю реалізації дискретної моделі на конкретній ПЕОМ, тобто зі здатністю отримати розв'язок відповідної системи алгебраїчних рівнянь за прийнятний час. Основними обмеженнями є обсяг оперативної пам'яті та ресурси обчислювального часу. Тому реальні алгоритми мають бути економічними як за кількістю арифметичних операцій, так і за обсягом необхідної пам'яті.

Розглянемо чисельні й аналітичні методи, що найчастіше застосовуються для наближеного розв'язання диференціальних рівнянь. ■

Поява методу скінченних елементів пов'язана з розв'язанням задач космічних досліджень (1950 р.). Він виник у межах будівельної механіки та теорії пружності, а згодом був теоретично осмислений математиками, які й досі [40], [41] досліджують його збіжність і точність. Інженери, використовуючи цей метод, розв'язують складні технічні задачі, часто не заглиблюючись у строге обґрунтування застосованих прийомів, а достовірність результатів підтверджується практичною апробацією алгоритмів, використанням комерційних пакетів МКЕ, експериментальними даними та порівнянням із відомими точними розв'язками.

Суть методу скінченних елементів полягає в тому, що будь-яку неперервну величину (переміщення, температуру, тиск тощо) можна подати у вигляді апроксимації моделлю, складеною з окремих елементів (ділянок). У межах кожного елемента така величина описується кусочно-неперервною функцією, що будується за значеннями цієї величини в обмеженій кількості точок.

У загальному випадку неперервна величина заздалегідь невідома, і необхідно визначити її значення у внутрішніх точках області. Водночас дискретну модель значно простіше сформулювати, якщо спочатку припустити, що значення цієї величини у певних внутрішніх точках (вузлах) відомі. Після цього можна перейти до загальнішого випадку.

Застосування МКЕ при розрахунку тонкостінних оболонкових конструкцій супроводжується певними труднощами, пов'язаними з отриманням достовірних результатів. Насамперед це проблема вибору скінченного елемента, який забезпечує необхідну точність за мінімальних витрат обчислювальних ресурсів. Це, своєю чергою, висуває високі вимоги до кваліфікації інженерів, оскільки для обґрунтованого вибору елемента з великої кількості варіантів, описаних у літературі, необхідно мати практичний досвід і чітко розуміти можливості кожного з них. У контексті досліджуваної задачі це означає проведення додаткових досліджень, обсяг яких є співставним із матеріалом даної дисертаційної роботи.

Метод скінченних різниць також широко застосовується для розв'язання задач міцності та стійкості оболонок завдяки простоті побудови алгоритмів, легкості реалізації на ПЕОМ та гнучкості щодо різних типів звичайних і частинних диференціальних рівнянь. Існує велика кількість варіантів заміни крайової задачі різницеvими схемами з різними порядками апроксимації, швидкістю збіжності та властивостями стійкості, а також численні методи розв'язання отриманих систем алгебраїчних рівнянь [42, 43].

У загальному випадку для переходу від диференціального рівняння до різницевого необхідно:

1. замінити область неперервної зміни аргументів дискретною множиною точок (сіткою);
2. апроксимувати диференціальне рівняння на цій сітці різницеvим співвідношенням.

Замість функції $\varphi(x)$ неперервного аргументу $x \in \Omega$, що належить функціональному простору R з межею Γ , розглядається сіткова функція дискретного аргументу x_i :

$$v^h(x_i) = v_i, \quad (3.23)$$

де x_i – вузол сітки ω_h .

Тут і надалі розглядається рівномірна сітка. Приклад – рівномірна сітка на відрізьку $0 < x < 1$ з кроком h : множина вузлів

$$\bar{\omega}_h = \{x_i = ih, i = 0, 1, 2, \dots, N, h = 1/N\};$$

$x_0 = 0, x_N = 1$ – граничні вузли;

$\bar{\omega}_h = \{x_i = ih, i = 0, 1, 2, \dots, N, h = 1/N\}$; – множина внутрішніх вузлів.

Множина сіткових функцій (3.23) утворює простір H_h (у наведеному прикладі – розмірності $N+1$), де індекс h відображає залежність сіткових функцій від кроку h як параметра. Таким чином, простір R замінюється простором H_h сіткових функцій $v^h(x)$.

Нехай задано лінійний диференціальний оператор L , що діє на функцію $v(x)$, $v \in C$. Введемо сітку ω_h і розглядатимемо сіткову функцію $v^h(x)$, $x \in \omega_h$. Замінемо L_v у точці $x_i \in \omega_h$ лінійною комбінацією значень $v^h(x)$ сіткової функції на деякій множині вузлів сітки $\omega_h \in \omega_h$:

$$L_h v^h(x_i) = \sum_j a_j v^h(x_j), \quad x_j \in \omega_h^*(C), \quad (3.25)$$

де a_j – коефіцієнти.

Така заміна L_v на $L_\Delta v_\Delta$ називається апроксимацією на сітці диференціального оператора L різницеvim оператором L_Δ , або різницевою апроксимацією оператора L [38]. Дослідження різницевих апроксимацій L_Δ оператора L зазвичай спочатку виконують локально, тобто в кожній фіксованій точці сітки. Побудову L_Δ розпочинають із вибору $\sigma_i(x)$, тобто множини вузлів, сусідніх із вузлом $x_i \in \omega_\Delta$, значення сіткової функції $v_\Delta(x)$ в яких можуть бути використані під час формування виразу для L_Δ .

Для $L_v = dv/dt = v'(t)$ візьмемо три вузли $(x-h, x, x+h)$ і, використавши формулу Тейлора, отримаємо вирази [38]:

$$L_\Delta^+ v = \frac{v(x+h) - v(x)}{h} = v_x \quad (\text{права різницева похідна}),$$

$$L_\Delta^- v = \frac{v(x) - v(x-h)}{h} = v_x \quad (\text{ліва різницева похідна}), \quad (3.26)$$

$L_\Delta^0 v = \frac{v(x+h) - v(x-h)}{2h} = v_x$ (центральна різницева похідна),
Визначимо різницеvim оператор

$$L_\Delta v = \sigma v_x + (1 - \sigma) v_x, \quad (3.27)$$

де σ – дійсний параметр.

Прийнято [38], що різницевий оператор $L\Delta$ апроксимує диференціальний оператор L в точці $x = x_i$, якщо різниця

$$\psi = L\Delta v_i - Lv(x_i), \quad (3.28)$$

що називається похибкою апроксимації оператора L оператором $L\Delta$, прямує до нуля при $h \rightarrow 0$. Кажуть, що $L\Delta$ має m -й порядок апроксимації в точці x_i , якщо:

$$\psi = L\Delta v(x) - Lv(x_i) = O(h^m), \quad \text{або} \quad |\psi| \leq Mh^m, \quad (3.29)$$

де $M = \text{const} > 0$ не залежить від h , $m > 0$.

Щоб встановити наявність апроксимації, достатньо розкласти за формулою Тейлора в точці $x = x_i$ значення $v_{i\pm 1} = v(x_i \pm \Delta)$, що входять до різницевого рівняння $L\Delta v_i$.

Проте при застосуванні методу скінченних різниць у випадку диференціальних рівнянь високого порядку зі змінними коефіцієнтами виникає проблема коректності отриманих розв'язків, оскільки необхідні дослідження стійкості, коректності побудованої різницевої схеми та отримання апріорних оцінок є ускладненими для задач такого типу крайових задач.

Метод малого параметра дає змогу розв'язувати диференціальне рівняння, що містить параметри (змінні коефіцієнти), шляхом знаходження частинних розв'язків для деяких фіксованих значень цих параметрів, які задовольняють граничні умови. У такому разі можливим є подання розв'язку диференціального рівняння у вигляді ряду за степенями:

$$e_1 - e_1^*, \quad e_2 - e_2^*, \quad \dots, \quad e_n - e_n^*,$$

де e_1, \dots, e_n – параметри, що входять до рівняння, e_1^*, \dots, e_n^* – їх часткові значення, за яких отримано частинний розв'язок. Метод малого параметра має один недолік – громіздкі аналітичні обчислення.

Розв'яжемо крайову задачу (3.1), (3.2) методом малого параметра та подамо шукану функцію σ у вигляді ряду розкладу за степенями α :

$$\sigma = \sum_{i=0}^{\infty} \alpha^i \sigma_i$$

(3.30)

Навантаження (41) також подамо у вигляді ряду:

$$q = \sum_{i=0}^{\infty} \alpha^i q_i \quad (3.31)$$

Підставивши (54), (55) у (47), прирівнявши коефіцієнти при однакових степенях параметра α та обмежившись трьома членами розкладу, отримаємо:

$$\sigma_0'''' + 4a^4 \sigma_0 = q_0;$$

$$\sigma_1'''' + 4a^4 \sigma_1 = q_1 - 3k\sigma_0'' - 6kax\sigma_0' - 4ka'x\sigma_0, \quad (3.33)$$

$$\begin{aligned} \sigma_2'''' + 4a^4 \sigma_2 = q_2 - 3k\sigma_1'' - 6kax\sigma_1' - 6k(3k-1)a^2x^2\sigma_0'' - \\ - 3k(3k-1)a^2x^2\sigma_0' - 4kax\sigma_1' - \dots \end{aligned}$$

Розв'язання системи (56) з урахуванням (46) знайдемо методом невизначених коефіцієнтів. У результаті отримаємо:

$$\sigma_0 = e^{\xi}(C_1 \cos \xi + C_2 \sin \xi) + e^{-\xi}(C_3 \cos \xi + C_4 \sin \xi) + \frac{q_0}{4a^4};$$

$$\begin{aligned} \sigma_1 = e^{\xi}(D_1 \cos \xi + D_2 \sin \xi) + e^{-\xi}(D_3 \cos \xi + D_4 \sin \xi) + b_{10}\xi + \\ + e^{\xi}[P_1(\xi) \cos \xi + P_1(\xi) \sin \xi] + e^{-\xi}[\dots]; \end{aligned}$$

$$\sigma_2 = e^{\xi}(F_1 \cos \xi + F_2 \sin \xi) + e^{-\xi}(F_3 \cos \xi + F_4 \sin \xi) + b_{20}\xi +$$

де коефіцієнт

$$+ e^{\xi}[a_9(\xi) \cos \xi + a_9(\xi) \sin \xi] + e^{-\xi}[S_9(\xi) \cos \xi + T_9(\xi) \sin \xi];$$

$$A_{11} = \frac{1}{2h} (\cos 2a_1L - 1 - 2a_1L - 2 \sin a_1L \cos a_1L)$$

$$A_{12} = \sin^2(a_1L) \cdot ch^2(a_1L) - \cos^2(a_1L) \cdot sh^2(a_1L)$$

$$\sigma a_1 D_1 = \dots \quad A = \dots \quad B_1 = \dots$$

$$A_{1x} = -\frac{1}{2} (E_{21} \sin a_1L \cos a_1L + E_{22} \cos a_1L \cdot sh(a_1L) - E_{23} \sin a_1L \cdot ch(a_1L))$$

$$\begin{aligned}
P_1(\xi) &= \frac{1}{a}(a_{11}x^2 + a_{12}x) & Q_1(\xi) &= \frac{1}{a}(a_{13}x^2 + a_{14}x) \\
S_1(\xi) &= \frac{1}{a}(a_{21}x^2 + a_{22}x) & T_1(\xi) &= \frac{1}{a}(a_{23}x^2 + a_{24}x) \\
a_{10} &= -4a^4 & a_{11} &= -\frac{1}{2}a^2(C_1 + C_2) & a_{12} &= 4a^2C_2 \\
a_{13} &= \frac{1}{2}a^2(C_1 - C_2) & a_{14} &= -\frac{1}{2}a^2C_2 & a_{21} &= \frac{1}{2}a^2(C_1 - C_4) \\
a_{22} &= -\frac{1}{2}a^2C_3 & a_{23} &= \frac{1}{2}a^2(C_3 + C_4) & a_{24} &= -\frac{1}{2}a^2C_2
\end{aligned} \tag{3.34}$$

Розв'язання крайової задачі (47), (46) з урахуванням трьох членів розкладу матиме вигляд:

$$\begin{aligned}
\sigma &= e^{\xi}[(C_1 + D_1 + F_1) \cos \xi + (C_2 + D_2 + F_2) \sin \xi] + \\
&+ e^{-\xi}[(C_3 + D_3 + F_3) \cos \xi + (C_4 + D_4 + F_4) \sin \xi] + \\
&+ e^{\xi}\{[P_1(\xi) + P_2(\xi)] \cos \xi + [Q_1(\xi) + Q_2(\xi)] \sin \xi\} + \\
&+ e^{-\xi}\{[S_1(\xi) + S_2(\xi)] \cos \xi + [T_1(\xi) + T_2(\xi)] \sin \xi\} + \dots
\end{aligned}$$

Громіздкість аналітичних виразів (56) обмежує застосування методу малого параметра, хоча він і дає прийнятні результати.

У працях [45], [26] обґрунтовано використання скінченно-різницевої реалізації методу малого параметра на прикладі розв'язання низки крайових задач, що описують НДС циліндричних оболонок і панелей змінної товщини, які перебувають під дією сталого або змінного тиску. Цей метод дає змогу уникнути трудомістких аналітичних обчислень і водночас розв'язати питання оцінювання точності одержаних результатів. Розглянемо його детальніше.

Застосуємо до системи крайових задач (56), (46) метод скінченних різниць звичайної точності. Уводячи простір $\Pi\Delta$ сіткових функцій, заданих на сітці $\omega\Delta$

та таких, що задовольняють граничні умови, отримаємо систему рівнянь, різницеві оператори якої наведено нижче:

$$u_i^{(1)} = \frac{1}{2h}(u_{i+1} - u_{i-1}),$$

$$u_i^{(2)} = \frac{1}{h^2}(u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}), \quad (61)$$

$$u_i^{(4)} = \frac{1}{h^4}(u_{i+2} - 4u_{i+1} + 6u_i - 4u_{i-1} + u_{i-2}),$$

де h – крок сітки $\omega\Delta$.

Замінюючи похідні в (56) їхнім скінченно-різницеvim аналогом (61), одержуємо різницеві крайові задачі, на основі яких будуємо системи алгебраїчних рівнянь, що в матричній формі записуються у вигляді:

$$A_i \mathbf{u}_i = \mathbf{C}_i, \quad i = 0, 1, 2, \dots$$

або в розгорнутому вигляді:

$$\begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} & B_{14} & B_{15} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & B_{32} & B_{33} & B_{24} & B_{33} & B_{36} & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_{33} & B_{34} & B_{35} & B_{36} & B_{37} & & 0 & 0 \end{pmatrix} = -C_i \quad (62)$$

де права частина має вигляд:

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & B_{19,19} \cdot 0 & \rightarrow & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rightarrow & \dots & B_{20,19} & B_{20,20} & \rightarrow & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & B_{21,19} \cdot B_{21,20} \cdot B_{21,21} & & & & \end{pmatrix}$$

В результаті розрахунків на ПЕОМ отримаємо ϵ набли: $u_i^\Delta = NUD_i$, де U_i при $i=0,1,2$.

Програмна реалізація розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь виконана на основі розроблених автором користувацьких функцій мовою програмування DELPHI ([61], [62]). Вікно прикладної програми, що забезпечує

користувацький інтерфейс і керування процесами трансляції виразів та пошуку кореня, описано в розділі 4.

Таким чином, реалізація цього методу на ПЕОМ можлива без використання комерційних пакетів комп'ютерної математики і не створює суттєвих труднощів для розробника, а для кінцевого користувача програмного комплексу, що містить даний алгоритм, усуває необхідність придбання дорогого програмного забезпечення для чисельних математичних розрахунків. Для перевірки отриманих результатів і чисельних математичних розрахунків. Для перевірки отриманих результатів і ефективності алгоритму можливе створення алгоритму розв'язання в пакеті MAPLE.

Результати розв'язання задачі (46), (47), отримані за допомогою скінченно-різницевої реалізації методу малого параметра, наведено на графіку (рисунок 12), де зміни відносних прогинів уздовж довжини оболонки визначено для таких параметрів геометрії та навантаження: об'єм – 100 м³, насипний матеріал – зерно пшениці (об'ємна маса 700 кг/м³, кут природного укосу $\varphi = 25^\circ$, коефіцієнт тертя по металу $f = 0,44$), $K = H/D$, де H – висота обичайки, D – внутрішній діаметр силоса;

$$\delta_0 = 4 \text{ мм}, \quad p_0 = 0,04 \text{ МПа}, \quad E = 190000 \text{ МПа}, \quad \mu = 0,33, \quad \alpha = 0,5; \quad \frac{R}{p_0}$$

На основі наведених вище міркувань можна дійти висновку про доцільність застосування скінченно-різницевої реалізації методу малого параметра для дослідження напружено-деформованого стану циліндричної оболонки змінної товщини, навантаженої змінним внутрішнім тиском.

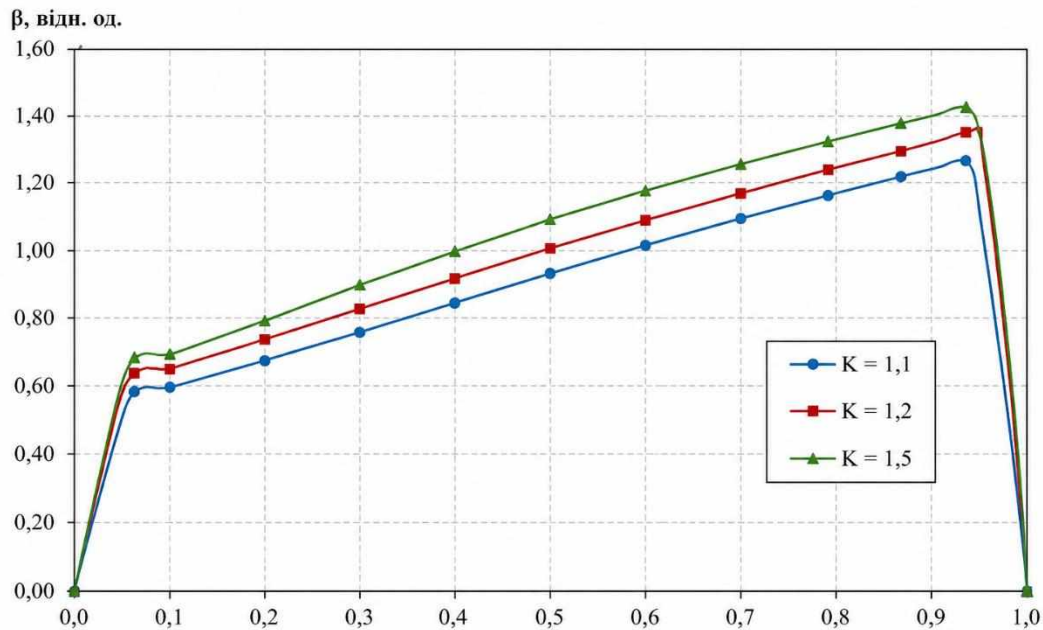


Рисунок 3.6 – Значення відносних прогинів W циліндричної оболонки за різних співвідношень діаметра і висоти (K)

3.4 Методика дослідження систем сервісного забезпечення

Ефективність експлуатації циліндричних силосів значною мірою визначається не лише конструктивними особливостями обладнання, а й рівнем організації системи сервісного забезпечення. У сучасних умовах експлуатації агропромислового обладнання сервісне забезпечення розглядається як комплекс організаційних, технічних та інформаційних заходів, спрямованих на підтримання працездатності обладнання протягом усього життєвого циклу.

Метою дослідження систем сервісного забезпечення є оцінювання впливу організації технічного обслуговування та використання сучасних засобів моніторингу на показники надійності, безвідмовності та ефективності роботи циліндричних силосів.

Методика дослідження передбачає виконання таких етапів:

- аналіз структури системи сервісного забезпечення силосів;
- визначення основних контрольованих параметрів;
- дослідження режимів технічного обслуговування;
- оцінювання впливу автоматизованих систем контролю;

– визначення показників ефективності функціонування сервісної системи.

Під час досліджень систему сервісного забезпечення розглядали як сукупність взаємопов'язаних підсистем підсистема технічного обслуговування; підсистема діагностики; підсистема моніторингу; підсистема ремонту; підсистема інформаційного забезпечення.



Рисунок 3. – Структурна схема системи сервісного забезпечення силоса

У процесі досліджень визначали такі параметри температура зернової маси; вологість продукції; рівень заповнення силоса; стан вентиляційної системи; ступінь корозійного пошкодження; технічний стан конструктивних елементів; параметри роботи допоміжного обладнання.

Контроль зазначених параметрів здійснювався за допомогою автоматизованих засобів моніторингу, до складу яких входять: температурні датчики; датчики вологості; датчики рівня; датчики навантаження; контролери збору даних; програмне забезпечення аналізу інформації.

Для оцінювання ефективності сервісної системи використовували показники надійності.

Коефіцієнт готовності системи визначався за формулою:

$$K_{\Gamma} = \frac{T_p}{T_p + T_{\text{в}}}$$

де K_{Γ} – коефіцієнт готовності;

T_p – середній час безвідмовної роботи;

$T_{\text{в}}$ – середній час відновлення.

Середнє напрацювання на відмову визначали за залежністю:

$$T = \frac{t}{n}$$

де T – середнє напрацювання на відмову;

t – загальний час роботи;

n – кількість відмов.

Для оцінювання ефективності використання цифрових технологій здійснювали порівняння двох варіантів організації сервісу традиційне технічне обслуговування за графіком; технічне обслуговування за фактичним технічним станом із використанням автоматизованого моніторингу.

Оцінювання ефективності проводили за такими критеріями: зменшення кількості відмов; зниження часу простою; скорочення витрат на ремонт; підвищення коефіцієнта готовності; зниження експлуатаційних витрат; підвищення якості зберігання продукції.

Використання автоматизованого моніторингу та елементів цифрового сервісу дозволяє своєчасно виявляти зміни технічного стану конструкції, прогнозувати можливі відмови та приймати обґрунтовані рішення щодо проведення технічного обслуговування або ремонту.

Таким чином, запропонована методика дослідження систем сервісного забезпечення дозволяє комплексно оцінити ефективність функціонування силоса та визначити напрями підвищення надійності його роботи.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі розроблено методику проведення досліджень, спрямованих на обґрунтування конструктивних та сервісних рішень щодо модернізації циліндричних силосів для підвищення ефективності зберігання сільськогосподарської продукції.

Розроблено програму досліджень, яка охоплює послідовне виконання аналітичних, теоретичних, розрахункових і чисельних етапів дослідження конструкції силоса, умов його експлуатації та систем сервісного забезпечення.

Сформовано методику дослідження напружено-деформованого стану конструкції силоса, що базується на використанні математичних моделей тонкостінних оболонок змінної товщини з урахуванням реальних експлуатаційних навантажень. Виконано обґрунтування використання спрощених моделей розподілу тиску сипкого матеріалу та лінійної апроксимації зміни товщини оболонки по висоті конструкції.

Розглянуто методику розрахунку основних елементів силоса, зокрема циліндричної оболонки, конічної воронки, опорних колон, кільцевих ребер жорсткості та конструкції даху. Наведені залежності дозволяють визначати раціональні геометричні параметри елементів конструкції та оцінювати їхню міцність і стійкість.

Проведено аналіз сучасних чисельних методів дослідження математичних моделей, зокрема методу скінченних елементів, методу скінченних різниць і методу малого параметра. Встановлено, що застосування скінченно-різницевої реалізації методу малого параметра дозволяє отримувати достатньо точні результати при меншій складності алгоритму та зменшенні обсягу обчислювальних ресурсів.

Розроблено методику дослідження систем сервісного забезпечення, яка передбачає оцінювання технічного стану конструкції, аналіз режимів технічного обслуговування та використання автоматизованих засобів моніторингу параметрів роботи силоса.

Встановлено, що застосування сучасних систем контролю та цифрових технологій дозволяє здійснювати безперервний моніторинг стану обладнання, підвищувати показники надійності, зменшувати ризик виникнення аварійних ситуацій та знижувати експлуатаційні витрати.

Отримані результати формують теоретичну та методичну основу для виконання подальших розрахункових досліджень, проведення обчислювального експерименту та оцінювання ефективності запропонованих конструктивних і сервісних рішень.

РОЗДІЛ 4. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

Висновки до розділу 4

У результаті аналізу технічного стану конструкції встановлено, що основним фактором, який визначає напружено-деформований стан силоса, є тиск зернової маси на внутрішню поверхню стінок. Виявлено, що найбільші навантаження виникають у нижній частині циліндричної оболонки та в зоні переходу до конічної воронки, де спостерігаються максимальні значення окружних напружень і локальних деформацій.

Проведене дослідження напружено-деформованого стану показало достатню збіжність теоретичних та експериментальних результатів, що підтверджує

коректність використаної математичної моделі та можливість її застосування для подальших інженерних розрахунків. Установлено, що характер розподілу напружень уздовж висоти конструкції має нелінійний характер та суттєво залежить від геометричних параметрів силоса і характеристик сипкого матеріалу.

За результатами аналізу впливу конструктивних параметрів встановлено, що найбільший вплив на роботу конструкції здійснюють співвідношення висоти до діаметра силоса, товщина оболонки та закон зміни товщини стінок по висоті конструкції. Визначено, що збільшення товщини стінок призводить до зменшення величини прогинів та напружень, однак супроводжується збільшенням матеріаломісткості конструкції.

Порівняльний аналіз різних варіантів конструктивних рішень показав, що використання ступінчасто-змінної товщини оболонки є найбільш ефективним. Запропоноване рішення дозволило зменшити масу конструкції приблизно на 11 %, скоротити витрати металу на 942 кг, знизити максимальні прогини до 36 %, а також зменшити витрати електроенергії під час виготовлення приблизно на 29 %.

У результаті оцінювання впливу модернізації на показники роботи встановлено, що впровадження автоматизованої системи моніторингу параметрів силоса забезпечує можливість безперервного контролю технічного стану конструкції, оперативного виявлення відхилень у режимах роботи та переходу до концепції технічного обслуговування за фактичним технічним станом обладнання.

Проведений аналіз показників надійності та сервісної придатності підтвердив, що модернізована конструкція має покращені експлуатаційні характеристики. Встановлено збільшення прогнозованого ресурсу роботи приблизно на 12–15 %, зростання коефіцієнта готовності з 0,91 до 0,96, а також зменшення трудомісткості технічного обслуговування та часу відновлення після відмов.

Отримані результати підтверджують ефективність запропонованих конструктивних та сервісних рішень і свідчать про доцільність їх застосування для підвищення надійності, економічності та експлуатаційної ефективності циліндричних силосів.

РОЗДІЛ 5. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБО

Висновки до розділу 5

Розроблено систему експлуатаційного сервісу силоса, яка базується на використанні сучасних методів технічного обслуговування, автоматизованого моніторингу та елементів цифрового управління. Запропонована система передбачає використання датчиків температури, вологості, рівня заповнення, навантаження та вібрації, що дозволяє здійснювати безперервний контроль технічного стану конструкції та своєчасно виявляти можливі відхилення параметрів від нормативних значень.

Проведено аналіз техніко-економічних показників базової та модернізованої конструкцій силоса. Встановлено, що використання ступінчасто-змінної товщини обичайки дозволяє знизити масу металоконструкції на 942 кг, що забезпечує зменшення матеріаломісткості конструкції приблизно на 11 %.

Отриманий результат свідчить про доцільність використання запропонованого конструктивного рішення з точки зору економії матеріальних ресурсів.

Виконано оцінювання енергоємності процесу виготовлення конструкції. Встановлено, що модернізований варіант конструкції забезпечує зменшення витрат електроенергії на зварювальні роботи на 362 кВт·год, що відповідає економії приблизно 29 % порівняно з базовим варіантом.

У результаті проведених економічних розрахунків визначено, що застосування модернізованої конструкції дозволяє зменшити капітальні витрати приблизно на 260 тис. грн, а також знизити питомі експлуатаційні витрати приблизно на 9–10 % порівняно з базовою конструкцією.

Розглянуто питання екологічної безпеки та зниження негативного впливу силосних комплексів на навколишнє середовище. Встановлено, що застосування сучасних систем аспірації, активної вентиляції, енергоефективних технологій та автоматизованого контролю дозволяє зменшити рівень запиленості, скоротити енергоспоживання та покращити умови експлуатації обладнання.

Проаналізовано питання охорони праці та виробничої безпеки під час експлуатації силосних комплексів. Визначено основні небезпечні фактори виробничого середовища та запропоновано комплекс технічних і організаційних заходів щодо підвищення рівня безпеки персоналу.

Таким чином, результати практичної реалізації підтверджують ефективність запропонованих конструктивних та сервісних рішень і свідчать про можливість їх використання для підвищення надійності, економічності та безпеки експлуатації циліндричних силосів.