

Вінницький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії

(повне найменування інституту, назва факультету (відділення))

Кафедра Будівництва, міського господарства та архітектури

(повна назва кафедри (предметної, циклової комісії))

## МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«Великорозмірні сталеві циліндричні резервуари для зберігання неагресивних рідин»

Виконала: студентка 2-го курсу, групи Б-21м \_\_\_\_\_

Спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія

(шифр і назва спеціальності)

\_\_\_\_\_ Криклива К.П.  
(прізвище та ініціали студента)

Керівник: к.т.н., доцент каф. БМГА

\_\_\_\_\_ Попов В. О.  
(прізвище та ініціали)

Опонент: к.т.н., доцент, зав. каф. ТЕ

\_\_\_\_\_ Степанов Д. В.  
(прізвище та ініціали)

**Допущено до захисту**

Завідувач кафедри БМГА

к.т.н., доц. Швець В. В.

(прізвище та ініціали)

« \_\_\_\_\_ » 2023 р.

Вінниця ВНТУ – 2023 рік



Вінницький національний технічний університет  
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет Будівництва, цивільної та екологічної інженерії  
Кафедра Будівництва, міського господарства та архітектури

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Напрямок підготовки 19 Архітектура та будівництво  
(шифр і назва)

Спеціальність 192 Будівництво та цивільна інженерія  
(шифр і назва)

Освітня програма Промислове та цивільне будівництво  
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри БМГА

Швець В.В.

«   » 2023 року

### ЗАВДАННЯ

#### НА МАГІСТЕРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРАНТА

Криклива Катерина Павлівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту(роботи) Великорозмірні сталеві циліндричні резервуари для зберігання неагресивних рідин

керівник роботи Попов Володимир Олексійович, к.т.н., доц. Каф. БМГА

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від «   » 20 року №   

2. Строк подання магістрантом роботи 21.05.2023

3. Вихідні дані до роботи: Робота – наукового спрямування. Форма – вертикальна, циліндрична із сферичним дахом. Призначення – для зберігання неагресивних рідин, в т.ч., води. Габаритні розміри резервуарів: діаметр – до 40 м, висота до 22 м, матеріал надземних конструкцій – сталеві листи різної товщини, матеріал підземних конструкцій – монолітний залізобетон, робочий об'єм до 20 000 м<sup>3</sup>. Навантаження – кліматичні, гідростатичний тиск, вакуум до 50 мм вод. ст. Дані інженерних вишукувань.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Вступ, у якому слід відобразити актуальність теми, мету, наукову новизну, практичне значення, задачі, об'єкт та предмет досліджень Науково-дослідна частина, що складається з трьох розділів: Розділ 1, у якому слід виконати аналіз стану питання з розрахунків і проектування великорозмірних металевих циліндричних ємностей, методи оптимізації, аналіз нормативних і літературних джерел по темі МКР; Розділ 2, у якому слід виконати аналітичне та скінчено-елементне моделювання напружено-деформованого стану великорозмірної ємності з урахуванням технологічних та кліматичних впливів;



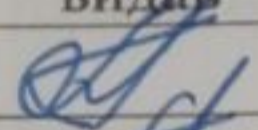
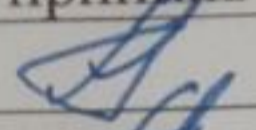


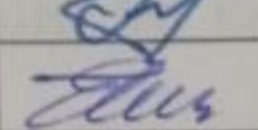
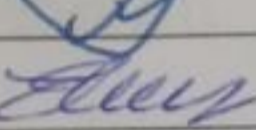
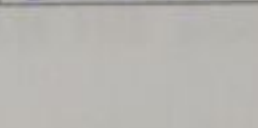
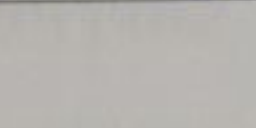
Розділ 3 – Конструктивні пропозиції з проектування нових та підсиленню існуючих резервуарів з урахуванням результатів моделювання, технологічні пропозиції з обмеження корисного об'єму резервуарів, Розділ 4 — Економічний, у якому дослідити економічний ефект запропонованих рішень у порівнянні з класичними; Висновки, в яких відобразити основні наукові та практичні результати виконаної роботи.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Плакати, що відображають:

1 — тему, мету та задачі роботи, наукову новизну, практичне значення; 2, 3 — стан питання з проектування циліндричних металевих ємностей; 4 — 5; 6 — 7 конструктивні та технологічні пропозиції; 8 – Результати економічних розрахунків; 9 – Висновки з МКР

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Вступ, Розділ 1	Попов В.О., доц. каф. БМГА		
Розділ 2	Попов В.О., доц. каф. БМГА		
Розділ 3	Попов В.О., доц. каф. БМГА		
Розділ 4. Економіка	Лялюк О.Г., доц. каф. БМГА		

7. Дата видачі завдання 30.01.2023

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів магістерської кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Виконати науковий аналіз стану питання з проектування резервуарів, пошук відповідних наукових джерел, аналіз сучасної нормативної бази. Оформити у вигляді Розділу 1	01.02-06.02.23	
2	Розробка Вступу до роботи	07.02-12.03.23	
3	Розробка Розділу 2 науково-дослідної частини розділу з моделювання напружено-деформованого стану резервуару	13.03-25.03.23	
4	Розробка розділу 3 (конструктивні та технологічні пропозиції)	27.03-03.04.23	
5	Розробка розділу 4 — Економіка	21.04-05.05.23	
6	Підготовка до опублікування та публікація результатів МКР. Апробація	06.05.-17.05. 23	
7	Перевірка роботи на плагіат	20.05-30.05.23	
8	Попередній захист магістерської роботи	05.06.23	

Магістрант

(підпис)

Криклива К.П.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Попов В.О.

(прізвище та ініціали)



## АНОТАЦІЯ

УДК 624.014

Криклива К. П. Великорозмірні сталеві циліндричні резервуари для зберігання неагресивних рідин. Магістерська кваліфікаційна робота зі спеціальності 192 – «Будівництво та цивільна інженерія», освітня програма – «Промислове та цивільне будівництво». Вінниця : ВНТУ, 2023. 108 с.

Укр. мовою. Бібліогр.: 50 назв; рис. 21; табл. 9.

В магістерській кваліфікаційній роботі досліджено напружено-деформований стан існуючих великорозмірних резервуарів, збудованих у в минулому, під дією комплексу кліматичних та технологічних, а, також, сейсмічних впливів для знаходження раціонального способу їх підсилення при реконструкції або капітальному ремонті. Виявлено найбільш небезпечні впливи, якими виявилися вакуум, що виникає при випуску робочої рідини та сейсмічні навантаження. Для цього розроблена модель сейсмічних впливів на реологічне середовища (заповнення резервуару), яка на сьогодні відсутня у нормах проектування.

При виконанні досліджень встановлено, що підсилювати існуючі резервуари буде дорожче, аніж зводити нові. Тому, обрано найбільш раціональних варіант їх використання – обмеження корисної місткості.

Встановлено, також, допустимі значення вакууму, яке не можна перевищувати при випуску робочої рідини.

Магістерська кваліфікаційна робота містить 18 аркушів графічної частини.

Ключові слова: тонкостінні оболонки, металеві циліндричні резервуари, напружено-деформований стан, оптимізація конструктивних параметрів, сейсмічні впливи підсилення конструкцій.

## ABSTRACT

UDK 624.014

Kryklyva K. P. Large-sized steel cylindrical tanks for storage of non-aggressive liquids. Master's qualification work in the speciality 192 - "Civil Engineering and Construction", educational programme - "Industrial and Civil Engineering". Vinnytsia: VNTU, 2023. 108 p.

In Ukrainian. Bibliography: 50 titles; fig. 21; tabl. 9.

The master's qualification work investigates the stress-strain state of existing large-sized tanks built in the past under the influence of a complex of climatic and technological, as well as seismic influences to find a rational way to strengthen them during reconstruction or overhaul. The most dangerous impacts were identified, which turned out to be the vacuum arising from the release of working fluid and seismic loads. For this purpose, a model of seismic impacts on the rheological environment (tank filling) was developed, which is currently not available in design standards.

The study found that it would be more expensive to reinforce existing tanks than to build new ones. Therefore, the most rational option for their use was chosen - limiting their useful capacity.

The permissible values of vacuum, which must not be exceeded when releasing the working fluid, were also established.

The master's qualification work contains 18 sheets of graphic part.

Key words: thin-walled shells, metal cylindrical tanks, stress-strain state, optimisation of design parameters, seismic effects of structural reinforcement.

## ВІДОМІСТЬ АРКУШІВ ГРАФІЧНОЇ ЧАСТИНИ

Аркуш	Найменування	Примітки
1	2	3
1	Наукова новизна та практичне значення	Плакат
2	Мета наукової роботи та наукові задачі	Плакат
3	Апробація і публікації	Плакат
4	Класифікація тонкостінних оболонок	Плакат
5	Загальний вигляд ємності	Плакат
6	Конструктивна схема ємності	Плакат
7	Загальний вигляд та технічний стан ємності №Е5А	Плакат
8	Напружено-деформований стан елементарного фрагмента бічної стінки	Плакат
9	Типові дефекти і пошкодження резервуарів	Плакат
10	Розподіл вітрового тиску та вакууму при вітрі на конструкції ємності	Плакат
11	Скінчено-елементна модель напружено-деформованого стану	Плакат
12	Тривимірне відображення моделі: ємності в цілому та опорного металокаркасу сферичного даху разом з опорним кільцем	Плакат
13	Деформації і еквівалентні напруження	Плакат
14	Втрата стійкості бічних стінок за 1-ю формою	Плакат
15	Моделювання сейсмічних впливів	Плакат
16	Вплив гідродинамічних тисків	Плакат
17	Економічний ефект пропонованого рішення	Плакат
18	Висновки	Плакат

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b>	8
<b>РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИКИ ПРОЕКТУВАННЯ СТАЛЕВИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ РЕЗЕРВУАРІВ</b>	12
1.1 Тонкостінні циліндричні оболонки, як будівельні системи	12
1.1.1 Сучасна класифікація тонкостінних оболонок	14
1.1.2 Область застосування оболонок	16
1.1.3 Історичний екскурс з проектування оболонок.	
Світова практика проектування тонкостінних оболонок	18
1.1.4 Сучасні нормативні документи з проектування оболонок	20
1.2 Основи розрахунку міцності тонкостінних оболонок за граничними станами	21
1.3 Конструкційні матеріали для формування тонкостінних оболонок	22
1.4 Метал, як сучасний і ефективний конструкційний матеріал, для конструкцій оболонок. Переваги металу над залізобетоном. Недоліки металу	23
1.5 Опис конструктивних складових типових резервуарів	26
1.5.1 Загальне конструктивне рішення резервуару	26
1.5.2 Функції конструктивних елементів	29
1.5.3 Типове кріплення складових частин оболонок. Кріплення на заклепках. Зварні кріплення.	32
1.6 Висновки по розділу 1	34
<b>РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЦИЛІНДРИЧНИХ РЕЗЕРВУАРІВ</b>	37
2.1 Опис роботи конструкцій циліндричного резервуару під навантаженням	37
2.2 Аналітичне моделювання роботи резервуарів під навантаженням	39
2.2.1 Кліматичні впливи	45
2.2.2 Технологічні навантаження на резервуар	46

2.2.3 Вплив вакууму на герметичні резервуари	58
2.2.4 Аварійні сейсмічні впливи	58
2.2.5 Аналітична оцінка внутрішніх зусиль і напружень у конструктивних елементах резервуарів	68
2.3 Уточнене скінчено-елементе моделювання резервуарів	76
2.3.1 Опис розробленої моделі	76
2.3.2 Модель конструкції під дією гідростатичних впливів	78
2.3.3 Модель конструкції під впливом вакууму	82
2.4 Висновки за результатами моделювання резервуарів	86
<b>РОЗДІЛ 3 КОНСТРУКТИВНІ ПРОПОЗИЦІЇ ПО ПІДСИЛЕННЮ ІСНУЮЧИХ РЕЗЕРВУАРІВ</b>	87
3.1 Типові дефекти і пошкодження резервуарів	87
3.1.1 Урахування викривлення геометрії	88
3.1.2 Способи захисту від корозії	90
3.2 Пропонована технологія ремонтних робіт	90
3.3 Висновки з конструктивних та технологічних пропозицій капітального ремонту резервуарів	92
<b>РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА</b>	94
4.1 Розрахунок кошторисної вартості ремонту існуючого резервуару на конкретному прикладі.	94
4.2 Визначення узагальнених вартісних показників (на 1 м <sup>3</sup> корисного об'єму конструкції)	96
4.3 Розрахунок економічного ефекту	98
<b>ВИСНОВКИ</b>	100
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b>	103
<b>ДОДАТКИ</b>	109
Додаток А Протокол перевірки магістерської кваліфікаційної роботи на наявність текстових запозичень	110
Додаток Б Відомість аркушів графічної частини	111



## ВСТУП

Великорозмірні сталеві циліндричні резервуари є важливою частиною промислового ландшафту і використовуються для зберігання неагресивних рідин, таких як нафта, газ, хімічні речовини та інші рідини. **Актуальність цієї теми** полягає у необхідності підтримки та покращення безпеки та ефективності резервуарів, як складних просторових систем, оскільки недбале виконання проектування, виготовлення та експлуатації може призвести до небезпеки для людей та навколишнього середовища.

Існує безліч випадків, коли несправність резервуарів призводить до небезпеки для життя та здоров'я людей, а також до серйозного забруднення довкілля. Однак, забезпечення безпеки великих резервуарів не є простою задачею, оскільки вони зазвичай знаходяться під дією гідростатичного та надлишкового тиску, що збільшує ризик аварії.

Оскільки, зазвичай, резервуари мають значну місткість (сотні та тисячі кубічних метрів об'єму), вони є важливими спорудами для забезпечення стабільності постачання та довготривалого зберігання різних рідин хімічної, енергетичної промисловості та сільського господарства. Таким чином, покращення безпеки та ефективності цих резервуарів є критично важливим для забезпечення надійного постачання рідин та зменшення втрат.

Поряд з цим, розробка нових технологій та інновацій щодо проектування та виготовлення резервуарів, як просторових тонкостінних систем, може покращити їх функціональність та знизити витрати на їх зведення та експлуатацію.

Дослідження в цій галузі можуть привести до розробки нових методів та технологій проектування, виготовлення, монтажу, експлуатації та ремонту великорозмірних сталевих циліндричних резервуарів. Також можливе дослідження властивостей нових матеріалів, які можуть забезпечити підвищену міцність, стійкість до корозії, термічну стійкість та інші властивості, що забезпечують безпеку та надійність зберігання рідин.

Проведення подальших наукових досліджень за цією тематикою може також призвести до вдосконалення методів та засобів контролю за станом

резервуарів під час їх експлуатації, що забезпечить більш ефективне використання цих конструкцій та підвищить рівень безпеки промислових підприємств.

**Мета наукової роботи** полягає у оптимізації конструкції та режимів експлуатації великорозмірних резервуарів на основі ґрунтовних досліджень їх напружено-деформованого стану. Вказані дослідження мають на меті, також, визначити найбільш ефективні та безпечні підходи до реконструкції, нового будівництва та експлуатації резервуарів;

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати комплекс **наукових задач**, які включають:

- аналіз сучасних вимог технічних нормативних документів та стандартів щодо проектування, виготовлення та експлуатації великорозмірних сталевих циліндричних резервуарів;
- вивчення характеристик матеріалів, використовуваних для виготовлення великорозмірних сталевих циліндричних резервуарів;
- вивчення впливу зовнішніх факторів (таких як температура, вітер, вологість, вплив сонячної радіації тощо) на роботу великорозмірних сталевих циліндричних резервуарів. Дослідження має на меті визначити оптимальні умови для експлуатації резервуарів та запобігання
- розробка аналітичної та скінчено-елементної моделей напружено-деформованого стану конструкцій великорозмірного циліндричного резервуару для зберігання неагресивних рідин на прикладі реальної споруди;
- пошук раціональних конструктивних та експлуатаційних параметрів існуючих резервуарів для зниження собівартості робіт з їх реконструкції.

**Об'єктом дослідження** є надземні великорозмірні сталеві циліндричні резервуари, які призначені для зберігання неагресивних рідин.



**Предметом дослідження** є напружено-деформований стан великорозмірних сталевих циліндричних резервуарів під дією комплексу кліматичних та технологічних навантажень.

**Наукова новизна** полягає у:

- розробці методики аналізу напружено-деформованого стану великорозмірних резервуарів для раціонального проектування;
- на основі виконаних досліджень, запропоновано метод, який дозволяє оцінити граничну висоту і, відповідно, граничну місткість існуючих резервуарів, для довільного корисного продукту без підсилення основних несучих елементів, що дозволяє без значних капітальних вкладень експлуатувати споруду за призначенням;
- на основі сучасного та закордонного досвіду розроблено модель поведінки реологічного-середовища (рідкого продукту) всередині ємності під дією сейсмічних впливів, оцінено силовий інерційний вплив на стінки резервуарів від рідкого продукту;
- запропоновано методику оцінки збуреної сейсмічними впливами хвилі на поверхні резервуару, що дозволяє у подальшому, виключити понаднормативних впливів на кришку великорозмірних резервуарів будь-якої місткості та форми.

**Практичне значення роботи** полягає у:

- розробленні інженерних рішень щодо раціонального обмеження ступеня вакууму у резервуарах;
- розробленні практичних рекомендацій щодо обмеження місткості резервуарів.

**Програма дослідження** включає наступні етапи:

- Аналіз літератури та стандартів щодо проектування, виготовлення, монтажу, експлуатації та ремонту великорозмірних сталевих циліндричних резервуарів. Оцінка стійкості та безпеки цих конструкцій.
- Дослідження властивостей матеріалів, які можуть бути використані для виготовлення сталевих циліндричних резервуарів. Аналіз їх стійкості до

корозії, механічної міцності та інших параметрів, які впливають на безпеку та надійність резервуарів.

- Розробка аналітичної та скінчено-елементної моделей напружено-деформованого стану конструкцій великорозмірного циліндричного резервуару для зберігання неагресивних рідин на прикладі реальної споруди
- Розрахунок кошторисної вартості ремонту сталевих циліндричних резервуарів.

### **Апробація результатів магістерської роботи**

Основні результати магістерської кваліфікаційної роботи доповідалися на ІІ науково-технічній конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 14-23 березня 2023 р.

### **Публікації.**

За матеріалами магістерської кваліфікаційної роботи опубліковані дві друковані праці [5, 35], одна з яких, [5] у – професійному фаховому виданні:

1. Попов В.О., Войцехівський О.В., Криклива К.П. Сейсмостійкість великорозмірного резервуару для зберігання метанолу. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Науково-технічний збірник. Вінниця, ВНТУ, 2023-1. С. 5 – 19 [5]. (Фахове видання)
2. Криклива К. П. Оптимізація експлуатаційних параметрів існуючих вертикальних металевих циліндричних резервуарів [Електронний ресурс] / В. О. Попов, К. П. Криклива // Матеріали ІІ науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 14-23 березня 2023 р. – Електрон. текст. дані. – 2023 [35]. – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2023/paper/view/17453>.

Стаття, що подана до редакції та готується до публікації:

- Попов В.О., Попова А.В., Криклива К.П. Стійкість оболонки металевого резервуару при впливі вакууму. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Науково-технічний збірник. Вінниця, ВНТУ, 2023-2.



## РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕОРІЇ ТА ПРАКТИКИ ПРОЕКТУВАННЯ СТАЛЕВИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ РЕЗЕРВУАРІВ

### 1.1 Тонкостінні циліндричні оболонки, як будівельні системи

Тонкостінні оболонки є одним із видів просторових конструкцій. Вони використовуються при будівництві споруд і будівель із приміщеннями великих розмірів (ангарів, стадіонів, ринків тощо). Тонкостінна оболонка має вигнуту поверхню, яка за мінімальної товщини  $t$ , відповідно, мінімальної маси і витрати матеріалу має велику несучу здатність, тому що завдяки криволінійній формі діє як просторова несуча конструкція [15].

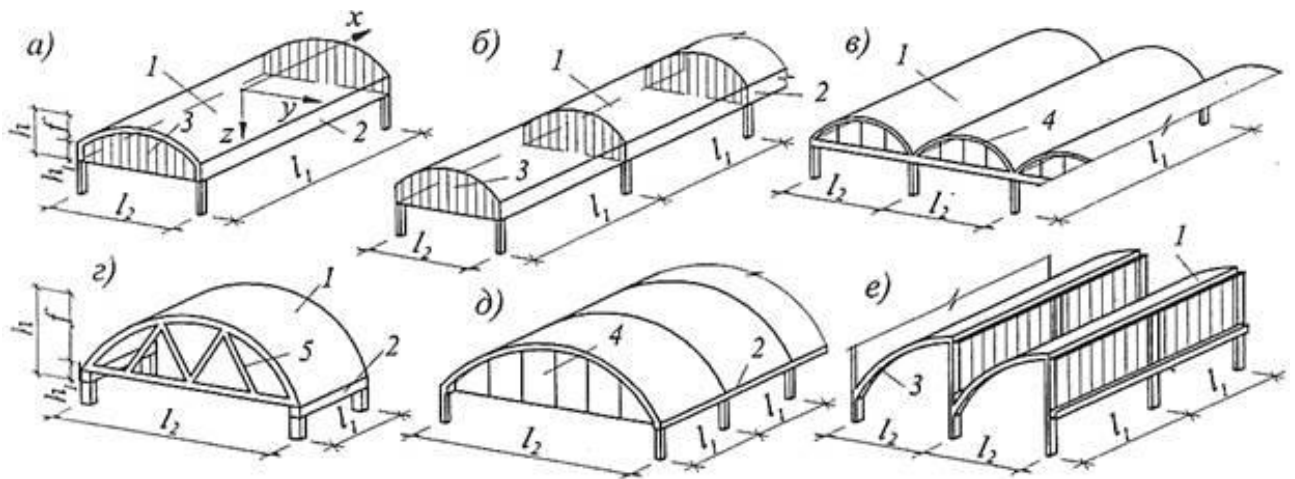
Багаторічний досвід досліджень, проектування, будівництва та експлуатації показав, що в просторових конструкціях покриттів ефективними є певні типи залізобетонних оболонок – циліндричні оболонки обертання горизонтального і вертикального розташування, куполи, пологі оболонки подвійної кривизни на квадратному або прямокутному планах, гіперболічні параболоїди (гіпари) [16].

Циліндричні оболонки (рис. 1.1) складаються з:

- оболонки, виготовленої у вигляді тонкої гладкої або ребристої плити, зігнутої по циліндричній поверхні;
- бортових елементів, що облямовують оболонку вздовж крайніх твірних;
- поперечних наскрізних або суцільних діафрагм, підтримуваних колонами або стінами.

Основні геометричні параметри циліндричних оболонок - проліт (довжина)  $L$ , ширина (хорда)  $B$ , радіус кривизни- $R$  і товщина оболонки -  $d$ .

*Довгі циліндричні оболонки  $L/B > 2$  виконуються переважно з ненапруженої арматури, їх прольоти рідко перевищують 30 м (з економічних міркувань). Ширина оболонок приймається рівною 7,5-12,5 м. Товщина:  $d=6 \dots 8$  см. Для оболонок необхідне влаштування бортових елементів (від 0,4 до 1,25 м)*



1 – оболонка; 2 – бортовий елемент; 3 – торцева діаграма у вигляді балки змінного перерізу; 4 – те саме, арки; 5 – те саме, ферми

Рисунок 1.1 – Конструктивні різновиди циліндричних оболонок та їх складові частини:

довгі: а – однопролітна; б – багатопролітна; в – багатохвильова;  
короткі: г – однопролітна; д – багатопролітна; е – шедова;

*Короткі циліндричні оболонки  $L/B < 1$  мають бортові елементи, розміри яких не перевищують 0,4 x 0,4 м. У коротких оболонках більш імовірна втрата стійкості, тому їх зазвичай виконують ребристими.*

Оболонку з  $B/L > 3$  (рис. 1.2) прийнято вважати аркою.

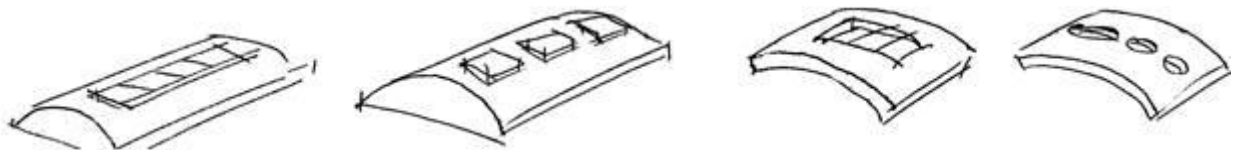


Рисунок 1.2 – Конструктивні різновиди арок

Дані оболонки не тільки добре сприймають розподілені навантаження, а й дають змогу створити візуально прийнятний інтер'єр з огляду на велику піднесеність, ефективно передати зусилля на контурні конструкції, забезпечити відведення поверхневих вод із покрівлі, створити можливість введення природного освітлення через ліхтарі [15].



### 1.1.1 Сучасна класифікація тонкостінних оболонок

Тонкостінні оболонки класифікують за наступними ознаками:

- матеріал виготовлення,
- функціонале призначенням,
- форма конструкції,
- спосіб монтажу,
- конструктивні особливості.

*За матеріалом виготовлення* оболонки поділяють на металеві та залізобетонні, також їх виготовляють з дерева, пластмас та інших матеріалів, які добре сприймають стискаючі зусилля.

Найбільшого поширення набули металеві та залізобетонні оболонки. Тонкостінна оболонка представляє собою пустотілий циліндр зі звичайного або попередньо напруженого залізобетону. Оболонки випускаються секціями довжиною від 6 до 12 м і зовнішнім діаметром від 1 до 3 м. Довжина секцій кратна 1 м, товщина стінок становить 12 см [16, 18].

**Металеві оболонки:** Тонкостінні оболонки, виготовлені з таких металів, як сталь, алюміній і титан, широко використовуються в різних галузях техніки завдяки їхній високій міцності, жорсткості та довговічності.

**Композитні оболонки:** Композитні матеріали, такі як армовані волокном пластмаси і композити з вуглецевого волокна, все частіше використовуються в тонкостінних корпусних конструкціях завдяки їх високому співвідношенню міцності до ваги, корозійній стійкості і стійкості до втоми.

**Керамічні оболонки:** Керамічні матеріали, такі як цирконій і глинозем, використовуються в деяких високотемпературних застосуваннях, де потрібні їхні відмінні термічні та механічні властивості[17].

**Скляні оболонки:** Тонкостінні оболонки зі скла, такі як боросилікатне скло і загартоване скло, використовуються там, де потрібна прозорість і висока міцність, наприклад, в акваріумах, теплицях і вітринах.

**Полімерні оболонки:** Тонкостінні оболонки з полімерів, таких як поліетилен і поліпропілен, зазвичай використовуються там, де важливі гнучкість, низька

вартість і простота виготовлення, наприклад, в пакувальних і складських контейнерах.

Дерев'яні обolonки: Тонкостінні обolonки з деревини, такі як фанера і ламінований шпон, використовуються там, де важлива природна естетика, низька вартість і простота виготовлення, наприклад, у виробництві меблів і будівельних конструкцій [17].

Залежно від *функціонального призначення* розрізняють такі обolonки: резервуари; газгольдери; бункери й силоси. Резервуари служать для зберігання нафтопродуктів, води, зріджених газів, кислот, спиртів та інших рідин. За величиною робочого тиску в газовому просторі резервуара розрізняють:

- резервуари низького тиску (до 2000 Па);
- резервуари з підвищеним тиском (до 70 000 Па);
- атмосферні резервуари (для зберігання важких нафтопродуктів, масла, мазуту та ін.).

За конструктивним виконанням/ *формою* сталеві резервуари поділяють на:

- вертикальні циліндричні;
- горизонтальні циліндричні;
- краплевидні;
- траншейні.

Газгольдери призначені для зберігання, змішування і вирівнювання складу газів. Їх включають у газову мережу між джерелами отримання газу і його споживачами як своєрідні акумулятори. Застосовують газгольдери постійного об'єму, в яких газ зберігають за високого тиску, і газгольдери змінного об'єму зі зберіганням газу за низького постійного тиску. Змінність об'єму забезпечують рухомими ланками або шайбою, яка, подібно до поршня в циліндрі, переміщається по стінці газгольдера. Місткість газгольдерів змінного об'єму досягає 600 тис. м<sup>3</sup>.

Бункери і силоси представляють собою ємності, призначені для зберігання і перевантаження сипучих матеріалів. Силоси відрізняються від бункерів порівняно

більшим відношенням висоти до розмірів у плані. Групи бункерів зазвичай об'єднують у бункерні естакади. Застосовують бункери з плоскими стінками і гнучкі (висячі).

За *способом установки* розрізняють наземні/незаглиблені та підземні/заглиблені резервуари. Найчастіше вони мають форму циліндра, але трапляються резервуари прямокутної та іншої форми.

За *конструктивними особливостями* резервуари поділяються на:

- з конічним щитовим покриттям;
- із сферичним покриттям.

Резервуари даних типів поділяються на: зі стаціонарним дахом без понтона; зі стаціонарним дахом та понтоном; з плаваючим дахом; герметичні та негерметичні [17, 18].

### 1.1.2 Область застосування оболонок

Тонкостінні просторові конструкції, елементами яких є оболонки, знаходять широке застосування в різноманітних галузях техніки, промисловості, енергетиці та ін., що пов'язано з поєднанням в них таких властивостей як відносна легкість і висока міцність.

Тонкостінні оболонки широко застосовують в авіа- і суднобудуванні, хімічному машинобудуванні, ракетній техніці та цивільному будівництві. Оболонки використовують в інженерних спорудах. Листові конструкції часто застосовуються, як правило, для зберігання, переміщення, технологічного перероблення рідин, газів і сипких матеріалів, і становлять близько 20% обсягу всіх металевих конструкцій.

Недоліком оболонок є підвищена трудомісткість виготовлення з огляду на криволінійність форми, а також для деяких типів - наявність неексплуатованого об'єму, що потребує опалення (наприклад, у великопролітних оболонках покриттів). Оболонки ефективні в підземному будівництві. Деякі типи оболонок ефективні і в перекриттях будівель, коли потрібно отримати великий проліт [16].

Нині багато світових компаній почали використовувати адитивну технологію 3D-друку для виготовлення своєї продукції. На початку 2018 року відома американська аерокосмічна корпорація Lockheed Martin представила перший надрукований на 3D-принтері бак для ракетного палива з титанового стопу (рис. 1.3) [18]. Вибір титану було обумовлено його високою питомою міцністю, термо- та корозійною стійкістю. У разі використання традиційних технологій виробництва циліндричних паливних баків, переважно, до 70–80% цінного матеріалу спрямовуються у відходи, що перероблюються. Новий спосіб друку від Lockheed Martin дозволяє в значній мірі (за даними компанії до 87%) економити на виробництві цих баків. Компанія вже використовувала цю технологію для створення супутникової системи зв'язку і компонентів для міжпланетної станції NASA Juno, а також планує виготовити зовнішню оболонку для космічного корабля «Оріон» із використанням технології 3D-друку [19].

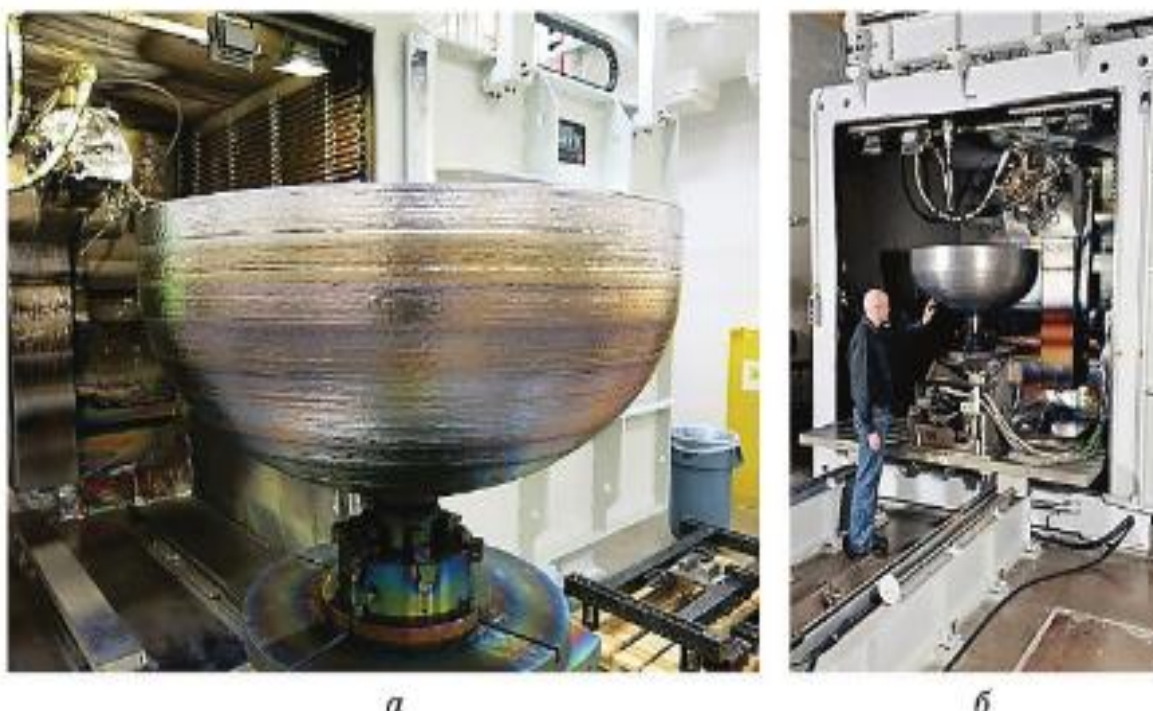


Рисунок 1.3 – Бак ракетного палива (а) і електронно-променева камера для 3D-друку (б)



### 1.1.3 Історичний екскурс з проектування оболонки. Світова практика проектування тонкостінних оболонки

З метою дослідження історії проектування тонкостінних оболонки, варто зазначити, що особлива увага в проектуванні оболонки зосереджувалася на купольних конструкціях. Простежуючи історію розвитку купольних покриттів, можна відзначити, що спочатку їхнім першочерговим завданням було перекриття великих просторових частин будівлі, але згодом вони набули значення не тільки великопролітної конструкції перекриття, а й естетичної прикраси міської забудови. Перші куполи застосовували в архітектурі громадських будівель, переважно в храмових спорудах, але завдяки появі нових і вдосконаленню наявних будівельних матеріалів і технологій їхнього зведення купольні конструкції стали використовувати в будівлях іншого функціонального призначення [20].

Розміри і конструктивні схеми купольних покриттів удосконалювалися залежно від застосовуваного будівельного матеріалу. Першими матеріалами, використовуваними для будівництва купольних конструкцій, були камінь і дерево. Куполи з природного каменю і цегли використовували приблизно до середини XIX століття через обмеження за розмірами будівель, що перекриваються, а дерев'яні купольні конструкції використовують донині. Дерево досить легкий і зручний матеріал в обробці, але не довговічний. Завдяки науково-технічному прогресу дерев'яні купольні конструкції почали зводити з клеєної деревини, яка дає змогу перекривати більші прольоти і є міцнішим матеріалом, ніж цілісний брус. Бетон і залізобетон у купольних покриттях почали широко використовувати приблизно з 70-х років XIX століття, тоді як метал для виробництва купольних конструкцій почали використовувати значно раніше, десь із кінця XVIII століття [20].

Перша залізобетонна купол-оболонка була збудована в 1925 р. в Єні. Діаметр її становив 40 м, це дорівнює діаметру купола Св. Петра в Римі. Маса цієї оболонки виявилася в 30 разів меншою за купол собору Св. Петра. Це перший

приклад, який показав перспективні можливості нового конструктивного принципу.

Варто згадати ще один будівельний матеріал, який почав використовуватися у виробництві купольних конструкцій з початку ХХ століття - це пластик, легкий, зручний дешевий матеріал, але поки що не знайшов ще широкого застосування через деякі негативні властивості та використовується в досить скромних проєктах (див. таблицю 1.1) [20].

Таблиця 1.1 – Динаміка розвитку купольних покриттів залежно від застосовуваного будівельного матеріалу

Матеріал	Часовий період застосування	Конструктивні схеми	Діаметр	Приклади
Камінь (природний камінь, цегла)	XIII ст. до н.е. - сер. XIX ст. н.е.	Цілісний купол	від 3 до 40 м	Храм св. Софії в Константинополі, собор Санта-Марія-дель-Фьоре у Флоренції, собор Св. Петра в Римі
Дерево	з XIII ст. до н.е. - до теперішнього часу	ребристий, ребристо-кільцевий, тонкостінний (із суцільним покриттям)	від 12 до 60 м	Преображенська церква в м. Кизи, залізничний вокзал у м.Річмонд, Державний цирк у м. Іваново
Бетон, залізобетон	з 70-х рр. XIX ст. - до теперішнього часу	цілісний (куполи-оболонки), сітчастий купол	від 10 до 130 м	– Пантеон у Римі, Малий палац спорту в Римі, – Зал століть у м. Вроцлав
Метал (сталь, алюміній)	з кінця XVIII ст. - до теперішнього часу	ребристий, ребристо-кільцевий, ребристо-кільцевий зі зв'язками, сітчастий, пластинчастий	до 230м	– Національний театр опери в Пекіні, – Будівля радіостанції в м. Краків, – Стадіон у м. Сан-Паулу
Пластмаса (склопластик, оргскло)	з 30-40 рр. ХХ ст. -до теперішнього часу	куполи-оболонки	одношарові - 9-10м тришарові - до 25м.	Застосовуються як zenітні ліхтарі в покритті будівель

Динаміка розвитку купольних конструкцій добре простежується під час з'ясування формотворчої ролі будівельних матеріалів (див. табл. 1.1).

Окрім купольних конструкцій у XVIII ст. набувають поширення інші види тонкостінних оболонок – резервуари. Перший сталевий резервуар був виготовлений у США у 1864 році. Він був не циліндричної форми, а прямокутної. У 1883 році російський інженер Володимир Григорович Шухов опублікував наукову статтю "Механічні споруди нафтової промисловості". У ній він навів розрахунки з будівництва циліндричних сталевих резервуарів. Так був запроєктований перший клепаний металевий резервуар, у якому потім зберігали нафту. За рахунок того, що він уже був циліндричної форми вдалося досягти зменшення витрати листового металу на виготовлення споруди. Його стінки були виготовлені зі склепаних листів заліза з плоским днищем, що лежить на піщаній подушці, і плоским або конічним дахом. Днище і дах сполучалися зі стінкою за допомогою металевих косинців. Надалі всі резервуари почали будувати як циліндр, і сфера застосування ємностей розширилася з допомогою появи нових матеріалів та інженерних рішень [15].

#### 1.1.4 Сучасні нормативні документи з проектування оболонок

Для забезпечення надійного та безпечного зберігання матеріальних цінностей у оболонках їх проектування, виготовлення, спорудження, експлуатація та навіть приймання замовником регламентовано державними будівельними нормами, вказаними нижче:

- ДСТУ EN 14620-1:2014 Проектування та спорудження на місці встановлення вертикальних циліндричних сталевих резервуарів із пласким дном для зберігання охолоджених скраплених газів за робочої температури від 0 °С до мінус 165 °С. Частина 1. Загальні положення (EN 14620-1:2006, IDT)
- ДСТУ-Н Б А.3.1-31:2015 Настанова з виготовлення і монтажу сталевих вертикальних циліндричних резервуарів для зберігання нафти і нафтопродуктів об'ємом від 100 м<sup>3</sup> до 50 000 м<sup>3</sup>

- ВБН В.2.2-58.2-94. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа
- ДБН В.2.2-43:2021 Складські будівлі.
- СНиП 2.09.03-85. Сооружения промышленных предприятий. ЦИТП Госстроя СССР, 1986. [11].

## 1.2 Основи розрахунку міцності тонкостінних оболонок за граничними станами

Тонкостінні оболонки широко використовуються в інженерному та конструктивному проектуванні, наприклад, у фюзеляжах літаків, посудинах під тиском і резервуарах для зберігання. Міцність цих оболонок є критичним фактором, який необхідно враховувати під час їхнього проектування, оскільки вони повинні витримувати навантаження і напруження, яких вони зазнаватимуть.

Для розрахунку міцності тонкостінних оболонок зазвичай використовується розрахунок за граничними станами, який широко застосовується в будівельній інженерії. Розрахунок за граничними станами передбачає визначення набору граничних станів, яким повинна задовольняти конструкція, щоб вважатися безпечною і надійною.

Існує два типи граничних станів, які зазвичай розглядають під час розрахунку міцності тонкостінних оболонок:

**Граничний стан (ULS):** Цей граничний стан визначає максимальне навантаження, яке може витримати оболонка до руйнування. ULS зазвичай визначається міцністю матеріалу і міцністю оболонки на зминання.

**Граничний стан надійності експлуатації (SLS):** Цей граничний стан визначає допустимі деформації і напруження, яких може зазнавати оболонка без погіршення її характеристик або функціональності. SLS зазвичай визначається гранично допустимими напруженнями і деформаціями, які визначають, виходячи зі сфери застосування і передбачуваного використання оболонки.

Для розрахунку міцності тонкостінної оболонки з використанням розрахунку за граничними станами зазвичай виконуються такі кроки:



- Визначити геометрію і властивості матеріалу оболонки, включно з її розмірами, товщиною і властивостями матеріалу, як-от межа плинності та модуль пружності.
- Визначити навантаження, яким піддаватиметься оболонка, включно із зовнішніми навантаженнями, як-от тиск або вага, а також внутрішніми навантаженнями, як-от теплове розширення або вібрація.
- Визначити критичні граничні стани оболонки, включно з ULS і SLS.
- Розрахувати напруження і деформації, яких зазнаватиме оболонка за певних навантажень, використовуючи аналітичні чи чисельні методи, такі як аналіз методом кінцевих елементів.
- Порівняти розраховані напруження і деформації з допустимими межами, визначеними граничними станами, і визначити, чи є оболонка безпечною і надійною за заданих навантажень.
- Якщо розрахункові напруження і деформації перевищують допустимі межі, змінити конструкцію оболонки для підвищення її міцності та відповідності критеріям граничних станів.

Загалом, міцність тонкостінних оболонок може бути розрахована за допомогою розрахунку за граничними станами шляхом визначення критичних граничних станів, розрахунку напружень і деформацій за заданих навантажень і порівняння результатів із допустимими межами. Дотримуючись цього підходу, інженери можуть проектувати безпечні та надійні тонкостінні оболонки, що відповідають вимогам їхнього передбачуваного застосування [17].

### 1.3 Конструкційні матеріали для формування тонкостінних оболонок

Як вже зазначено вище, тонкостінні оболонки - це конструкції, які мають невелику товщину порівняно з іншими розмірами. Конструкційні матеріали для формування тонкостінних оболонок повинні мати певні властивості, щоб забезпечити їх міцність і стабільність. Нижче наведено деякі з найпоширеніших матеріалів для тонкостінних оболонок:

Метали: Такі метали, як сплави алюмінію і титану, широко використовуються в аерокосмічній промисловості завдяки їх високому співвідношенню міцності до ваги. Вони також стійкі до втоми і добре піддаються формуванню, що робить їх придатними для формування тонкостінних оболонок.

Композити: Композитні матеріали, виготовлені з вуглецевих або скляних волокон, вбудованих в матричний матеріал, такий як епоксидна смола або поліестер, використовуються завдяки високому співвідношенню міцності до ваги і жорсткості. Вони також можуть формуватися в складні форми, що робить їх придатними для формування тонкостінних оболонок [17].

Кераміка: Кераміка, така як карбід кремнію і глинозем, використовується у високотемпературному застосуванні завдяки своїй високій температурі плавлення і термічній стабільності. Вони також хімічно інертні і мають хорошу зносостійкість, що робить їх придатними для формування тонкостінних оболонок в суворих умовах.

Пластмаси: Пластмаси, такі як полікарбонат і АБС, широко використовуються в автомобільній промисловості через їх низьку вартість і простоту виготовлення. Вони також легкі і мають хорошу ударостійкість, що робить їх придатними для формування тонкостінних оболонок у випадках, коли вага має значення.

Вибір матеріалу для тонкостінної оболонки залежить від конкретного застосування і його вимог, таких як міцність, жорсткість, вага і умови навколишнього середовища. Процес виробництва також відіграє значну роль у визначенні вибору матеріалу, оскільки деякі матеріали можуть бути більш придатними для певних методів виробництва, ніж інші [17].

1.4 Метал, як сучасний і ефективний конструкційний матеріал, для конструкцій оболонок Переваги металу над залізобетоном. Недоліки металу

На сьогоднішній день основними будівельними матеріалами, що використовуються для конструкцій оболонок, є сталь і бетон. Вони мають кілька схожих функціональних характеристик, але їхні конкурентні переваги сильно

різняться. Ключова відмінність пов'язана з технологією та організацією самого процесу будівництва.

Будь-який будівельний матеріал володіє позитивними та негативними характеристиками, не є винятком і металоконструкції, задіяні в процесі зведення будівель і споруд.

Металоконструкції мають ряд переваг, серед яких виділяють:

- Функціональність, що дозволяє зводити будівлі і споруди в різних областях, починаючи з індивідуального будівництва (житлові будинки, гаражі, підсобні споруди тощо) і закінчуючи промисловими об'єктами.
- Створення міцного та безпечного каркаса, здатного витримувати підвищені навантаження, стійкого до механічних пошкоджень.
- Швидкий і простий монтаж/демонтаж, проводиться в декілька основних етапів, що не вимагає застосування спеціалізованої техніки та тривалої підготовки.
- Активне використання типових елементів, що полегшує їх заміну у разі пошкодження.
- Підвищені показники міцності матеріалу, при порівнянні з цементом або деревом.
- Газо - і водонепроникність (на місцях стику окремих елементів досягається за рахунок застосування зварювання).
- Вторинна переробка демонтованих металоконструкцій дозволяє економічно витратити метал і повторно використовувати матеріал (шляхом переплавлення).
- Зниження витрат на будівництво завдяки скорочення термінів зведення будівель і споруд.
- Простий ремонт або підсилення, що не вимагає демонтажних робіт проводиться на місці.
- Малу вагу на тлі підвищеного рівня міцності дозволяє заощадити кошти і час, що витрачаються на встановлення фундаменту.

- Можливість установки в будь-який час року, не відштовхуючись від умов навколишнього середовища (опаді, низька температура і т. д.).

- Даний матеріал вважається ізотропним за умови ідентичності механічних і термічних властивостей уздовж усіх напрямків. Ізотропні матеріали можуть мати гомогенну або негомогенну мікроструктуру. Наприклад, сталь має ізотропні властивості, незважаючи на негомогенну мікроструктуру.

Досить великий список переваг на тлі доступної вартості та швидкого монтажу, що не вимагає використання спеціалізованої техніки, робить металоконструкції більш затребуваними з кожним роком. Однак виділяють наступні недоліки металоконструкцій:

- Вироби не стійкі до впливу високих температур. Металеві конструкції, виготовлені з сталі набувають пластичну форму при нагріванні понад  $600^{\circ}\text{C}$ , з алюмінію вже при  $300^{\circ}\text{C}$ , а значить, втрачають несучу здатність, що може призвести до обвалення будівлі. Цей недолік усувається шляхом облицювання вогнестійкими матеріалами або покриттям складових елементів спеціалізованими складами.

- Схильні до руйнування в результаті корозії. Тривалий вплив вологи, атмосферних опадів, хімічно агресивних середовищ (включаючи газу) здатне призвести до розвитку корозійних процесів. Щоб запобігти цьому, всі елементи металевих конструкцій покривають спеціальними речовинами, що запобігають прямий вплив на сталь.

У першому випадку для розв'язання проблеми потрібно обробка всіх складових елементів спеціалізованої фарбою. Знизити ризик руйнування конструкції під впливом температури, можна також шляхом обробки вогнетривкими складами або ж облицюванням матеріалами, стійкими до впливу високої температури [16,17].



## 1.5 Опис конструктивних складових типових резервуарів

До конструктивних елементів типових резервуарів належать:

- стінки
- днище
- стаціонарна або плаваюча кришка
- понтон
- сходи, майданчики, огорожі
- люки та патрубки

А також в склад конструкції кожного вертикального резервуара входить вузол кріплення заземлення.

Днище, стінка і настил даху можуть виконуватися як у полистовому, так і в рулонному виконанні. Полистове виконання передбачає виготовлення і монтаж елементів резервуара з окремих листів. Полотнища елементів резервуара виготовляють на заводі у вигляді рулонів, які згодом розгортають у проектне положення під час монтажу резервуара. Маса полотнищ повинна визначатися можливостями їх транспортування і монтажу.

Дах резервуара може бути стаціонарним, що спирається на стінку резервуара, і плаваючим на поверхні продукту.

З метою зменшення втрат продукту за рахунок його випаровування в резервуарах зі стаціонарним дахом використовуються понтони. Необхідність установлення понтонів визначається характеристиками продукту, що зберігається, і технологічними особливостями експлуатації резервуару.

Сходи для доступу на дах резервуара можуть бути шахтними, кільцевими, похилими (для резервуарів зі стаціонарними дахами) і пересувними (для резервуарів з плаваючими дахами) [21].

### 1.5.1 Загальне конструктивне рішення резервуару

Резервуари можуть мати різні конструктивні рішення залежно від їхнього призначення, розміру та місця розташування. Проте, далі наведено деякі загальні міркування щодо конструкції, які можна застосувати до більшості резервуарів:

**Матеріал:** Резервуари можуть бути виготовлені з різних матеріалів, таких як сталь, бетон, скловолокно, пластик або комбінація цих матеріалів. Вибір матеріалу залежить від продукту, що зберігається, місця розташування резервуара і його розміру.

**Розмір:** Розмір резервуара залежить від обсягу продукту, який необхідно зберігати. Резервуар має бути досить великим, щоб вмістити максимальний очікуваний обсяг продукту, з деяким додатковим простором для розширення та обслуговування.

**Форма:** Резервуари можуть мати циліндричну, прямокутну або сферичну форму. Вибір форми залежить від обсягу продукту, доступного простору і місця розташування резервуара.

**Фундамент:** Резервуари вимагають міцного фундаменту, щоб витримувати їхню вагу і протистояти зовнішнім силам, таким як вітер і землетруси. Фундамент може бути виготовлений з бетону, сталі або інших матеріалів залежно від розміру і розташування резервуара.

**Вентиляція:** Резервуари мають бути спроектовані таким чином, щоб забезпечити належну вентиляцію для запобігання скупченню небезпечних парів або випарів. Цього можна досягти за допомогою вентиляційних отворів, витяжних вентиляторів або інших систем вентиляції.

**Ізоляція:** Резервуари, в яких зберігаються продукти, що вимагають підтримання певної температури, потребують ізоляції для підтримання необхідної температури. Тип і товщина ізоляції залежать від продукту, що зберігається, і розташування резервуара [16,21].

**Засоби безпеки:** Резервуари мають бути оснащені засобами безпеки, як-от клапани скидання тиску, системи аварійного вимкнення і системи пожежогасіння, щоб запобігти нещасним випадкам і мінімізувати збитки в разі аварії.

**Доступ:** Резервуари мають бути спроектовані таким чином, щоб забезпечити легкий доступ для обслуговування та огляду. Цього можна досягти за допомогою люків, отворів для доступу або інших засобів.

Покриття: Для захисту від корозії або хімічного впливу на резервуари можуть знадобитися покриття. Тип покриття залежить від матеріалу резервуара і продукту, що зберігається.

Транспортування: Резервуари, які необхідно транспортувати, вимагають спеціальних конструктивних рішень, як-от посилення, опорні конструкції і стяжки для забезпечення безпечного транспортування.

Впуск і випуск: Резервуари повинні мати правильно спроектовані вхідні та вихідні з'єднання для забезпечення безпечного та ефективного завантаження і вивантаження продукції. Це охоплює такі аспекти, як витрата, номінальний тиск, а також відповідні клапани і фітинги.

Екологічні міркування: Резервуари мають бути спроектовані з урахуванням екологічних міркувань, таких як запобігання витокам або розливам, які можуть призвести до забруднення ґрунту і джерел води. Це передбачає використання систем вторинної ізоляції, систем виявлення витоків, а також планів із запобігання та ліквідації розливів.

Відповідність нормативним вимогам: Резервуари повинні відповідати різним нормативним вимогам, таким як норми і стандарти проектування, будівництва та експлуатації. Ці вимоги можуть відрізнятися залежно від типу продукту, що зберігається, місця розташування резервуара і регулюючих органів [21].

#### А) Опис конструкції вертикального резервуару

Конструкція типових надземних циліндричних ємностей для зберігання неагресивних хімічних речовин, загалом, подібна. Розглянемо її на прикладі великорозмірного резервуару для зберігання метанолу, розташованого у Одеській області на території одного з хімічних підприємств.

Отже, ємність, що розглядається, являє собою металевий вертикальний циліндричний безкаркасний резервуар, виготовлений з листової сталі у вигляді:

- листового днища конічної форми із конусністю з ухилом не більше 1:100;
- циліндричної стінки змінної по висоті товщини;

- тонколистового сферичного даху, вирішеного у вигляді збірних секторіальних щитів, які сходяться у центральному кільці. Щити мають металевий каркас з двотаврів, швелерів та кутиків;
- в місці приєднання даху до стінки до конструкцій ємності приварено опорне кільце жорсткості;
- на даху та в верхній частині обичайки резервуару передбачені сервісні майданчики для обслуговування технологічного обладнання (засобів пожежогасіння, якщо рідина, що зберігається, - горюча, різноманітних датчиків, манометрів тощо).

Резервуар, як і більшість подібних конструкцій, встановлюють на залізобетонних плитно-кільцевих ростверках, які передають навантаження на ґрунт основи через систему паль. Якщо ґрунт має добрі фізико-механічні характеристики, іноді, такі ємності влаштовують на плитних фундаментах циліндричної форми.

Бічна стінка виготовляється з циліндричних поясів (кілець), з'єднаних між собою двобічними зварними швами впритул.

Висота цоколя над вимощенням приймається від 1 до 2 м.

Загальна просторова жорсткість металевої безкаркасної ємності забезпечується жорстким з'єднанням її елементів у просторову геометрично незмінну систему, жорстким приєднанням до фундаментів анкерними болтами та силами тертя днища об залізобетонну поверхню кільцевого ростверку.

Зовнішня поверхня металоконструкцій ємностей в переважній більшості фарбується світловідбивними емалями білого, сріблястого або світло сірого кольорів кольору.

### 1.5.2 Функції конструктивних елементів

Стінка, даний елемент конструкції є ключовим, оскільки його висота і діаметр дають змогу створювати ємності різного об'єму. При цьому замовники мають право призначати геометричні характеристики (з урахуванням рекомендацій основного профільного нормативного документа).

Крім того, характеристики стінки безпосередньо впливають на безпеку всього виробу. Для підвищення якої використовуються:

- матеріали виготовлення з оптимальними характеристиками, причому для кожного конкретного випадку;
- надійні методи з'єднання листів сталі та інших частин стінок між собою;
- силові елементи, які підвищують міцність резервуара загалом. Наприклад, до них належать кільця жорсткості.
- А також для виключення фінансових втрат через витік рідини, що зберігається в ємності, потрапляння її в ґрунт, повітря використовуються подвійні стінки.

Тобто в цьому разі будь-яка вертикальна споруда для зберігання рідини являє собою виріб типу "стакан у стакані". При цьому зовнішня стінка є захисною. Бо запобігає негативним наслідкам для довкілля, людей у разі розгерметизації внутрішньої.

Дахи - для задоволення всіх потреб замовників цей елемент конструкції резервуарів буває різних видів. У результаті дахи діляться на: стаціонарні та плаваючі. В свою чергою перераховані типи мають низку підвидів. Наприклад, стаціонарні конструкції поділяються на: безкаркасні та каркасні.

Перший варіант є оптимальним для невеликих ємностей (до 5000 м<sup>3</sup>).

Каркасні дахи коштують дорожче, але вони здатні витримати на порядок більше динамічне навантаження. Тому їх використовують при виготовленні резервуарів, об'єм яких становить понад 5000 м<sup>3</sup>.

Крім того, каркасні дахи безпечніші й можуть нівелювати наслідки вибуху рідини, її випарів. Причина в тому, що зазначені вироби є легкоскридними. Тобто в разі виникнення надлишкового тиску всередині ємності настил каркасного даху миттєво руйнується, що дає змогу нормалізувати ситуацію. Важливо й те, що знижується, до того ж істотно, ймовірність пошкодження і деформування конструкції ємності [21].

Спільно з дахами може використовуватися таке обладнання, як понтони. Які являють собою металеві диски, що плавають на поверхні рідини. І використовуються для обладнання резервуарів, які мають стаціонарний дах.

Така особливість свідчить про те, що понтони служать не для захисту рідини від впливу зовнішніх факторів, а для запобігання її випаровуванню. Причому ефективного, оскільки втрати скорочуються на значні 95-98%. А також понтони виключають:

- утворення зовнішньої вибухо- і пожежонебезпечної зони;
- вплив парів на навколишнє середовище.

Для забезпечення потрібного ефекту площа понтона має займати не менше 90% поверхні рідини і бути газонепроникною.

Днище резервуару – даний елемент конструкції резервуарів буває плоским і конічним. Перший різновид днища вважається оптимальним рішенням для невеликих ємностей, обсяг яких не перевищує 1000 м<sup>3</sup>.

У всіх інших випадках використовують вироби конічної форми. Перевага яких у кращих характеристиках міцності. Конічні днища бувають двох підвидів, а саме з ухилом: до центру; від центру.

Останній варіант найбільш затребуваний, оскільки особливості його конструкції не дають змоги донному осаду забруднювати всю площу днища.

Крім того, популярності конічних виробів з нахилом від центру сприяє те, що їх виготовляють з більш товстого металу. Це підвищує надійність, довговічність [16, 21].

З південно-східного, південного та південно-західного боку ємності обгороджують жалюзійними тіньовими екранами, які захищають сектор ємності, що найбільше піддається впливу сонячного випромінювання. Жалюзійні екрани часто складається з одного, двох, або трьох окремих рівнів екрану, з гофрованого оцинкованого профнастилу. Сам екран часто виконаний з оцинкованої сталі. Листи екрану з'єднані між собою заклепками чи самонарізними гвинтами.



Елементи екрану приєднані до прогонної системи, у вигляді швелерів, двотаврів, коробчастих перерізів кронштейнами. Опорні стійки опираються на залізобетонні фундаменти.

Зовнішня поверхня металоконструкцій жалюзійного екрану пофарбована світловідбивними емалями.

Доступ до ємностей часто забезпечується через шахтні сходи, що змонтовані поза територією ємностей, виходячи з міркувань безпеки. Сходи часто виготовляють з просічно-витяжного листа, привареного до кутикового обрамлення, змонтованого на металевих косоурах з металевих стрічок з перильним огороженням з металевих кутиків. Сходи часто монтують всередині баштових конструкцій з металевих двотаврів та швелерів, з'єднаних розпірками, хрестовою та хрестово-ромбічною системою ґрат з металевих кутиків.

Від башти шахтних сходів до верхнього рівня ємності, на якому монтують оглядові майданчики, улаштовують перехідні містки

Для захисту ємностей від прямих ударів блискавки по чотирьох кутах поза територією майданчику часто встановлюють блискавкозахисні вежі [17, 21].

### 1.5.3 Типове кріплення складових частин оболонок. Кріплення на заклепках. Зварні кріплення

З'єднання компонентів оболонок може здійснюватися різними способами, з яких два найпоширеніші - заклепкове та зварне з'єднання на заклепках. Заклепкове кріплення передбачає використання металевого кріплення, яке називається заклепкою, що вставляється через отвори, просвердлені в компонентах, які з'єднуються. Потім заклепка забивається або стискається, в результаті чого кінець заклепки розширюється і утворює головку, яка утримує компоненти разом. Заклепкові кріплення зазвичай використовуються там, де потрібна висока міцність і надійність.

Зварні кріплення із заклепками, з іншого боку, передбачають зварювання компонентів разом, а потім посилення з'єднання заклепками. Цей метод може

забезпечити навіть більшу міцність, ніж просто заклепкове кріплення, оскільки в процесі зварювання компоненти сплаваються разом, створюючи дуже міцний зв'язок. Додавання заклепок ще більше зміцнює з'єднання і забезпечує додаткову механічну міцність [15, 21].

Обидва методи мають свої переваги і недоліки, і вибір між ними залежить від багатьох факторів, таких як використовувані матеріали, необхідна міцність з'єднання і конкретне застосування [15].

Ще одним фактором, який слід враховувати при виборі методу кріплення, є простота монтажу та демонтажу. Заклепкові кріплення вимагають спеціалізованого обладнання та кваліфікованої робочої сили для встановлення, а після встановлення їх важко зняти, не пошкодивши навколишній матеріал. Зварні кріплення із заклепками також можуть бути складними для демонтажу, оскільки процес зварювання створює міцний зв'язок, який важко розірвати.

Крім заклепкових і зварних кріплень із заклепками, інші методи кріплення включають болти, гвинти, клеї та з'єднувачі із застібкою. Болти і гвинти зазвичай використовуються в тих випадках, коли з'єднання необхідно розбирати для обслуговування або ремонту. Клеї можуть забезпечити міцне з'єднання без використання додаткового обладнання, але вони можуть не підходити для застосувань, де очікується високе механічне навантаження. Затискні з'єднувачі можуть бути корисними там, де важлива швидка і легка збірка, але вони можуть не забезпечити такий же рівень міцності, як інші методи кріплення.

Загалом, вибір методу кріплення буде залежати від багатьох факторів, включаючи вимоги до міцності з'єднання, простоту збирання та розбирання, а також конкретне застосування [21].

Ще одним фактором, який слід враховувати при виборі методу кріплення, є середовище, в якому буде використовуватися з'єднання. Наприклад, якщо з'єднання буде піддаватися впливу високих температур, агресивних хімічних речовин або інших суворих умов, метод кріплення повинен бути здатний витримати ці умови без погіршення або ослаблення.

Заклепкові кріплення, як правило, більш стійкі до корозії, ніж зварні кріплення із заклепками, оскільки матеріал заклепок зазвичай виготовляється з корозійностійкого металу, такого як алюміній або нержавіюча сталь. Зварні заклепки можуть потребувати додаткового покриття або обробки для захисту від корозії [15, 21].

Вартість також є важливим фактором при виборі методу кріплення. Заклепкові кріплення можуть бути дорожчими за інші методи через спеціалізоване обладнання та кваліфіковану робочу силу, необхідну для монтажу. Зварне кріплення заклепками також може бути дорогим через додатковий процес зварювання та необхідність використання високоякісних заклепок.

Таким чином, вибір найкращого методу кріплення складових частин залежить від низки факторів, включаючи вимоги до міцності з'єднання, простоту монтажу і демонтажу, умови навколишнього середовища і вартість. Як заклепкове, так і зварне кріплення за допомогою заклепок мають свої переваги і недоліки, і вибір того чи іншого методу буде залежати від конкретних вимог застосування [15, 21].

Важливо також відзначити, що досягнення в галузі матеріалознавства і технологій призвели до розробки нових методів кріплення, які пропонують підвищену міцність, довговічність і простоту збірки. Наприклад, клейове з'єднання і композитні матеріали можуть забезпечити міцне, легке і стійке до корозії з'єднання, яке може бути більш придатним для деяких застосувань, ніж традиційні методи кріплення [15].

## 1.6 Висновки по розділу 1

На основі представленої інформації можна зробити висновок, що існує значна потреба в розробці теорії проектування тонкостінних циліндричних оболонок, особливо для резервуарів з металу, які використовуються для зберігання рідких речовин.

У даному розділі було підкреслено важливість резервуарів та їх широке використання в різних галузях промисловості. Резервуари виконують критичні

функції зберігання та транспортування рідких речовин, і їхні конструкції повинні бути надійними, безпечними та стійкими до зовнішніх навантажень.

Існуючі стандарти проектування таких резервуарів можуть не враховувати всі можливі умови навантаження, такі як внутрішній тиск, вітер, землетруси та зміни температури, що може призводити до небезпечних конструкцій. Тому існує потреба в розробці більш комплексної теорії, яка може врахувати всі можливі умови навантаження та забезпечити безпечні та надійні конструкції резервуарів.

Таким чином, розробка комплексної теорії для проектування тонкостінних циліндричних оболонок, особливо резервуарів з металу для зберігання рідких речовин, є критично важливим напрямком досліджень. Ця теорія повинна враховувати всі можливі умови навантаження, включаючи статичні та динамічні навантаження, а також ефективно моделювати реакцію матеріалу на ці навантаження.

Така розробка теорії може підвищити безпеку, надійність та ефективність цих резервуарів і сприяти сталому розвитку різних галузей промисловості, які покладаються на них. Врахування всіх можливих умов навантаження у процесі проектування дозволить уникнути несподіваних вад, деформацій та аварійних ситуацій, а також забезпечить оптимальну конструкцію резервуара з точки зору економічності та енергоефективності.

Крім того, розробка такої комплексної теорії повинна враховувати екологічні аспекти. Забезпечення сталого розвитку та мінімізація впливу на навколишнє середовище є важливими факторами у процесі проектування резервуарів. Розробка нових матеріалів та технологій, спрямованих на зменшення витрат енергії та негативного впливу на довкілля, можуть бути включені до комплексної теорії для підвищення стійкості резервуарів до корозії та інших впливів.

Отже, розробка комплексної теорії проектування тонкостінних циліндричних оболонок для резервуарів з металу має вирішальне значення для безпеки, надійності та ефективності цих конструкцій. Ця розробка допоможе забезпечити стаке функціонування резервуарів і відповідність їхніх конструкцій

міжнародним стандартам безпеки. Подальші наукові дослідження в цьому напрямку сприятимуть прогресу та розвитку сучасних технологій зберігання рідких речовин та позитивно позначаться на різних галузях промисловості та суспільстві в цілому.

## РОЗДІЛ 2 МОДЕЛЮВАННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЦИЛІНДРИЧНИХ РЕЗЕРВУАРІВ

### 2.1 Опис роботи конструкцій циліндричного резервуару під навантаженням

Згідно з літературними джерелами [1, 5, 9-11, 13], циліндричні ємності є ефективними спорудами при дії внутрішнього надлишкового та гідростатичного тисків, що забезпечує стійкість і геометричну незмінність їх форми від вітрових впливів, зокрема, при заповненні корисним навантаженням. Однак, надземні тонкостінні резервуари, зокрема великорозмірні, погано себе функціонують без корисного навантаження, оскільки їх незначна вага не компенсує зсуваючої компоненти вітрових та сейсмічних впливів, а також їх оболонка з великим радіусом кривизни не є стійкою до зовнішніх впливів. Також, важливим питанням є поведінка великорозмірних резервуарів під дією сейсмічних впливів, для яких наразі відсутня достовірна вітчизняна нормативна методика з оцінки сейсмостійкості [5], тому слід використовувати методика, викладену у [5 та 12], для їх розрахунку.

Металеві герметичні ємності для рідких неагресивних речовин працюють за декількома технологічними режимами. Перший режим – гідростатичні випробування, які перевіряють герметичність ємності шляхом заповнення її морською водою. Другий режим – робочий, що полягає в заповненні ємності на 95% об'єму робочою рідиною з надлишковим тиском інертних газів. Третій режим - вакуум, використовується в аварійному стані при випуску робочої рідини і є найнебезпечнішим для резервуарів. Четвертий режим – також аварійний і пов'язаний з землетрусами. Для оцінки міцності резервуару важливо визначитися з осьовими та радіальними напруженнями, загальними еквівалентними напруженнями та порівняти їх значення з межею міцності.

Нескінченно малий елемент, вирізаний з тіла ємності, при безмоментній теорії, в залежності від розрахункової ситуації, знаходиться у напружено-деформованому стані, зображеному на рис. 2.1,а) або рис. 2.1,б).



Осьові стискаючі напруження  $\sigma_o$  складаються з напружень від власної ваги металоконструкції ємності  $p_{\Sigma gi}^p$ , тиску на стінки від корисних впливів на сервісні майданчики  $p_{\Sigma Fp}$ , ваги снігу  $p_{sm}$  і ожеледі  $p_{ice}^p$ .

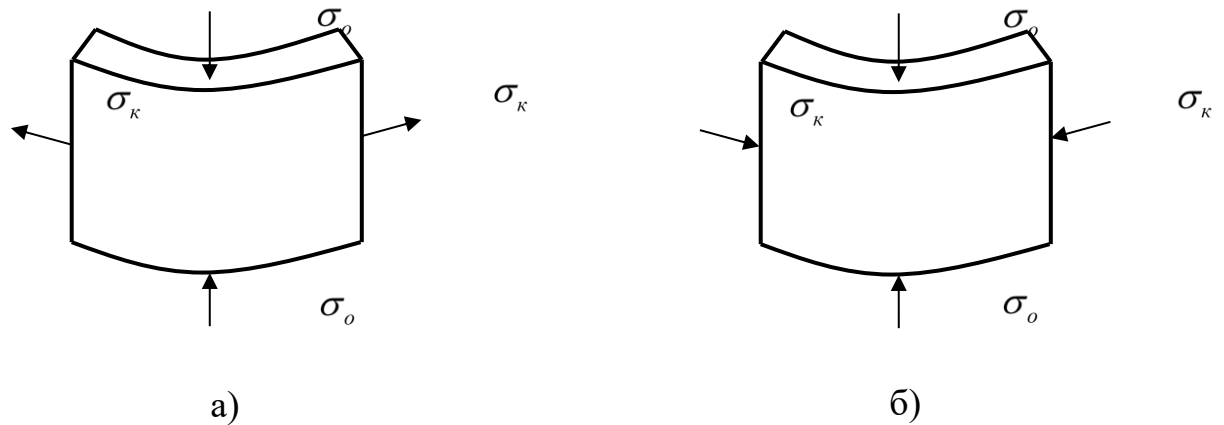


Рисунок 2.1 – Напружений стан елемента циліндричної обичайки (стінки) ємності: а – при гідростатичних випробуваннях, б – при вакуумі та порожній ємності в момент ураганного вітру

При розрахункових впливах осьові напруження рівні:

$$\sigma_o^p = p_{\Sigma gi}^p + p_{\Sigma Fp} + p_{sm} + p_{ice}^p. \quad (2.1)$$

Радіальні (кільцеві) напруження  $\sigma_k$ , викликані гідростатичним тиском від морської води:

$$\sigma_k^p = \frac{p_i \cdot D_{вн}}{2 \cdot \Delta_i}. \quad (2.2)$$

Для оболонки обертання загальні нормальні напруження в довільному перерізі визначаються за формулою (2.3):

$$\frac{\sigma_m}{r_m} + \frac{\sigma_k}{r_k} = \frac{p}{\Delta}, \quad (2.3)$$

де  $p$  – гідростатичний тиск;  $\sigma_m$  – меридіональні (осьові) напруження;  $\sigma_k$  – кільцеві напруження;  $r_m$  – меридіональний радіус кривизни, що утворює криву обертання;  $r_k$  – радіус кривизни в кільцевому напрямку.

Еквівалентні напруження для оболонок, які працюють за безмоментною теорією, визначаються за [4, формула 14.1]:

$$\sigma_{екв} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y^2 + 3 \cdot \tau_{xy}^2}, \text{ [МПа]}. \quad (2.4)$$

За умови, що дотичні напруження малі у порівнянні з нормальними:

$$\sigma_{екв} = \sqrt{\sigma_o^2 + \sigma_k^2 - (\sigma_k \cdot \sigma_o)^2}, \text{ [МПа]}. \quad (2.5)$$

## 2.2 Аналітичне моделювання роботи резервуарів під навантаженням

Виконаємо аналітичне моделювання роботи металевого циліндричного резервуару на прикладі існуючих великорозмірної споруди, збудованої на території одного з хімічних підприємств у м. Южне Одеської області, із такими характеристиками.

Споруда (згідно з джерелами [1, 8]) є ємнісним пристроєм, що виготовлений з листової сталі та складається з наступних конструктивних елементів:

- листового днища плоскої форми з циліндричною листовою стінкою змінної по висоті товщини з внутрішнім діаметром 39,9 м;
- тонколистового сферичного даху, що складається з збірних секторних щитів, які сходяться у центральному кільці. Каркас щитів виконаний з двотаврів, швелерів та кутиків;
- опорне кільце жорсткості, яке приварене до конструкцій ємності в місці приєднання даху до стінки;
- сервісні майданчики на даху та в верхній частині обичайки резервуару.

Ця споруда є важливим елементом інфраструктури для зберігання і транспортування різних рідин із збільшеним обсягом виробництва, і є результатом використання листової сталі та складних інженерних алгоритмів.

Конструкція резервуару взята з [1] та з альбому типового проекту сталевих вертикальних циліндричних резервуарів для нафти та нафтопродуктів, типовий проект №704-1-70 [8].

При моделюванні вважалося, що резервуар встановлений на залізобетонному плитно-кільцевому ростверку, який передає навантаження на скельний ґрунт основи.

Бічна стінка згідно [1] та [8] виготовлена з 11 рівнів поясів, з'єднаних між собою зварними швами впритик. Перший рівень – товщиною 17 мм, другий – 16 мм, 3 ... 8 рівні – 14 мм, 9 ... 11 рівні – 13 мм. Рівні з 1 по 8 мають висоту 1490 мм кожний, з 9 по 11 – 1990 мм. Таким чином, загальна проектна висота бічних стінок більше на 10 мм за проектну і складає 17 890 мм.

Нижні 8 поясів стінки (товщиною 17, 16 та 14 мм), крайні сектори днища, люки і лази виготовлені зі сталі 09Г2С-12-1 за ТУ 14-1-3023-80. Верхні пояси стінки (товщиною 13 мм), середня частина днища, несучі елементи покриття, настил даху, анкерні кріплення – зі сталі ВСт3Гпс5-1 за ТУ 14-1-3023-80.

До конструкцій циліндричної обичайки в нижній частині стінки з прикріплені металеві кронштейни, через які ємність приєднана до фундаментів.

Металева безкаркасна ємність має загальну просторову жорсткість, яка забезпечується жорстким з'єднанням її елементів у просторову геометрично незмінну систему та приєднанням до фундаментів за допомогою анкерних болтів та сил тертя між днищем та фундаментом. Для затінення від прямих сонячних променів у деяких місцях ємність обладнана жалюзійним екраном. Доступ до ємності забезпечується за допомогою сходової системи та перехідних містків. Згідно з джерелами [1] та [8], основні габаритні розміри ємності прийняті для моделювання.

- внутрішній діаметр обичайки	39,9 м
- висота циліндричної частини	17,89 м
- радіус сферичного даху	60,0 м
- висота сегмента сферичного даху	3,4 м

- загальна висота споруди від рівня цоколя 21,52 м

Корисний об'єм 20 000 м<sup>3</sup>.

За типовим проектом [8] у м. Южне у кінці минулого століття була зведена реальна споруда для зберігання метанолу, загальний вигляд якої наведено на рис. 2.2 – рис. 2.4



Рисунок 2.2 – Загальний вигляд великорозмірної ємності з південного боку  
(максимального впливу сонячних променів)



Рисунок 2.3 – Загальний вигляд ємності із північного (затіненого) боку

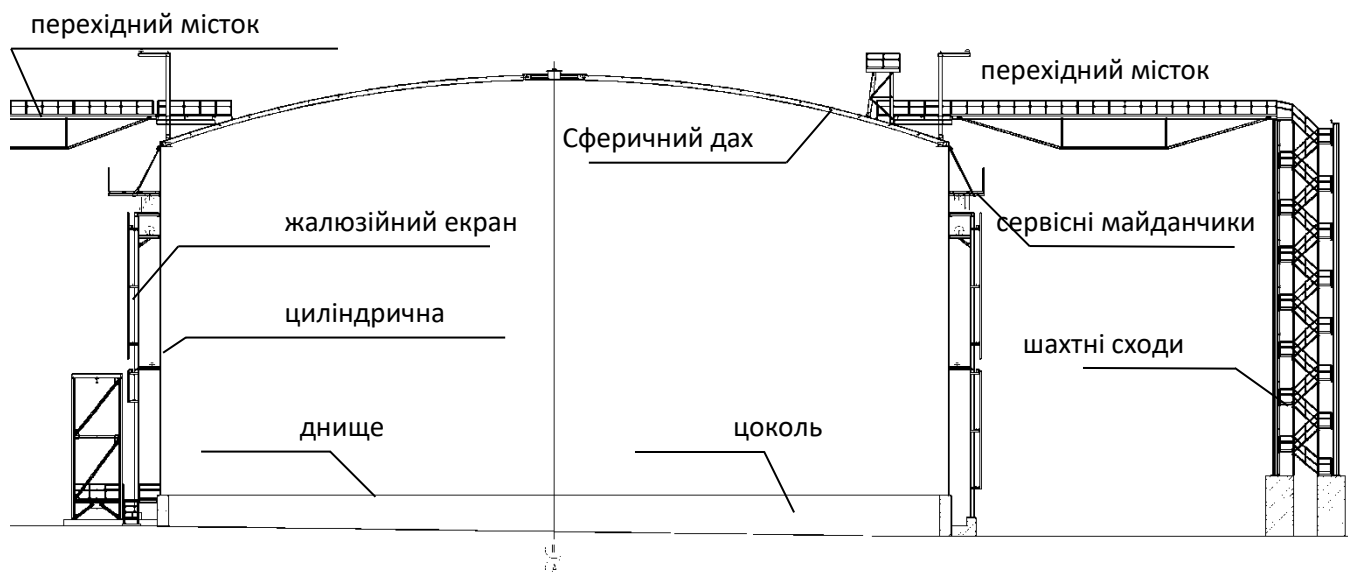


Рисунок 2.4 – Конструктивна схема ємності

#### **А) Алгоритм розрахунків**

Моделювання напружено-деформованого стану ємності є складною науково-практичною задачею, через наявність в середині реологічного середовища (рідини заповнення). Тому при розрахунку необхідно детально описати невідгідні

розрахункових ситуацій, враховуючи технологічні особливості; виконати їх науковий аналіз. Після цього слід виконати оціночні аналітичні та уточнені скінчено-елементні розрахунки.

Технологічні навантаження. Корисний тиск на сервісні майданчики  $p_{н20} = 6 \text{ кПа}$  та  $p_{н17} = 2 \text{ кПа}$ . Вага ізоляційних конструкцій даху  $g_i = 1 \text{ кПа}$ . Коефіцієнт перевантаження по рідині  $\gamma_{fm1} = 1,1$  [11, с.18, табл. 6]. Коефіцієнт перевантаження по тиску інертного газу та по вакууму  $\gamma_{fm2} = 1,2$  [11, с. 18, табл. 6]. Коефіцієнт умов роботи стінки в рівні днища  $\gamma_{c1} = 0,7$ , коефіцієнт умов роботи інших елементів стінки  $\gamma_{c2} = 0,8$ , коефіцієнт умов роботи при розрахунку стійкості  $\gamma_{c3} = 1,0$  [11, с.17, табл. 5].

Встановлений нормативами термін експлуатації ємності – 30 років – резервуари для хімічної промисловості [3, додаток В]. Клас наслідків (відповідальності) ємності – СС-3 (значні наслідки) [1].

Оскільки споруда зводиться в умовах м. Южне Одеської області, згідно з класифікацією [3], будівельний майданчик знаходиться в 3-му вітровому; 2-му сніговому; 5-му ожеледному районі; і має наступні кліматичні характеристики:

- снігове навантаження – 870 Па;
- вітровий тиск – 490 Па;
- товщина кірки ожеледі – 24 мм;
- сейсмічність – 8 балів за картою ЗСР-2004-С.

При виконанні розрахунків ємності класу наслідків (відповідальності) СС-3, основні несучі конструкції якої відносяться до категорії відповідальності конструкцій «А», І категорії за напруженим станом [4, с. 125, п.15], для основних сполучень навантажень за [2, с.24, табл. 5], прийнято коефіцієнти надійності  $\gamma_n^I = 1,25$  – для 1-ї групи та  $\gamma_n^{II} = 1,05$  – для 2-ї групи граничних станів.

Опис розрахункових ситуацій. Для великорозмірних ємностей, заповнених рідинами існує декілька видів робочих станів.



1-й режим – гідростатичні випробування (заповнення 100% циліндричної частини резервуару морською водою).

2-й режим – робочий. Виконується заповнення ємності на визначену частину об'єму циліндричної частини робочою рідиною з надлишковим тиском інертних газів 500 мм вод. ст.

3-й режим – вакуум 50 мм вод. ст.

Варіанти завантажень:

1) Варіант 1. Гідростатичні випробування заповненням ємності на 100% циліндричної частини + кліматичні впливи (снігові відкладення + ожеледні відкладення) + корисні впливи на сервісні майданчики. Гідростатичні випробування виконуються морською водою. Загальна висота стовпа рідини (морської води) густиною  $\rho_g = 1010 \text{ кг/м}^3$  в момент випробування рівна загальній висоті за виключенням місця приєднання елементів даху, тобто  $h_p = 17,88 \text{ м}$  (стан випробування). На цьому етапі, у випадку недостатньої міцності, буде виявлена гранична висота наповнення  $h_{pu}$ .

2) Варіант 2. Вакуум  $p_g = -50 \text{ мм вод. ст.} = -0,5 \text{ кПа}$  з розрахунковим вітровим тиском + снігові відкладення (позаексплуатаційний стан, ємність порожня). На цьому етапі, у випадку недостатнього запасу стійкості стінки, буде виявлений граничний від'ємний тиск (вакуум)  $p_{vu}$ .

3) Варіант 3. Робочий надлишковий тиск –  $p_n = 400 \text{ мм вод. ст.} = 4 \text{ кПа}$ , гідростатичний тиск від заповнення ємності метанолом на висоту до  $h_{pu}$  + кліматичні впливи (робочий стан).

4) Варіант 4. Вакуум  $p_{vu}$  + розрахунковий вітровий тиск + снігові відкладення. Ємність в момент викачки (порожня). (позаексплуатаційний стан).

5) Варіант 5. Вакуум  $p_{vu}$  + снігові відкладення + ожеледні відкладення + вітер при ожеледі. Ємність в момент викачки (порожня). (позаексплуатаційний стан).

Виконаємо попередній оціночний розрахунок резервуару для верифікації проектних товщин елементів. Розрахунок виконано за методикою, викладеною в [4], [9] та [10] з урахуванням вимог [11, 12].

### 2.2.1 Технологічні навантаження на резервуар

А) Оцінка напружень у стінці резервуару при розтязі гідростатичним тиском

Обчислюємо граничну розрахункову величину надлишкового гідростатичного тиску в рівні нижнього обрізу стінки при гідростатичних випробуваннях (варіант 1):

$$p^p = \rho_e \cdot g \cdot h_p \cdot \gamma_{fml} \cdot \gamma_n^I, [\text{кПа}]. \quad (2.6)$$

$$\text{Звідки: } p_1^p = 1010 \cdot 10 \cdot 17,88 \cdot 1,1 \cdot 1,25 = 248,3 \text{ (кПа)}.$$

Те саме в рівні низу стінки товщиною 16, 14 та 13 мм відповідно:

$$p_2^p = 1010 \cdot 10 \cdot (17,88 - 1,49) \cdot 1,1 \cdot 1,25 = 227,6 \text{ (кПа)};$$

$$p_3^p = 1010 \cdot 10 \cdot (17,88 - 2 \cdot 1,49) \cdot 1,1 \cdot 1,25 = 206,9 \text{ (кПа)};$$

$$p_4^p = 1010 \cdot 10 \cdot (17,88 - 8 \cdot 1,49) \cdot 1,1 \cdot 1,25 = 82,8 \text{ (кПа)}.$$

Експлуатаційний надлишковий гідростатичний тиск:

$$p^e = \rho_e \cdot g \cdot h_p \cdot \gamma_{fe1} \cdot \gamma_n^{II}, [\text{кПа}]. \quad (2.7)$$

$$\text{Звідки: } p_1^e = 1010 \cdot 10 \cdot 17,88 \cdot 1 \cdot 1,05 = 189,6 \text{ (кПа)}.$$

$$p_2^e = 1010 \cdot 10 \cdot (17,88 - 1,49) \cdot 1 \cdot 1,05 = 173,8 \text{ (кПа)};$$

$$p_3^e = 1010 \cdot 10 \cdot (17,88 - 2 \cdot 1,49) \cdot 1 \cdot 1,05 = 158,1 \text{ (кПа)};$$

$$p_4^e = 1010 \cdot 10 \cdot (17,88 - 8 \cdot 1,49) \cdot 1 \cdot 1,05 = 63,2 \text{ (кПа)}.$$

Обчислюємо параметр тонкостінності:

$$\frac{D_{\text{вн}}}{2 \cdot \Delta_{\text{max}}} = \frac{39\,900}{2 \cdot 17} = 1173 \gg 20.$$

Умова виконана. Розрахунок циліндричного резервуару виконується за безмоментною теорією.

Для циліндричних оболонок  $r_m = \infty$ ,  $r_k = r \approx D_{\text{вн}}/2$ , де  $r$  – радіус основи резервуару.

$$r_k = r = \frac{D_{\text{вн}}}{2} = \frac{39\,900}{2} = 19\,950 \text{ (мм)}.$$

Формула (2.2) набуває вигляду (2.8):

$$\sigma_k = \frac{p \cdot r}{\Delta}, \text{ [МПа]}. \quad (2.8)$$

Отже, кільцеві напруження розтягу від впливу рідини при гідростатичних випробуваннях ємності поблизу днища:

$$\sigma_{k1} = \frac{248,3 \cdot 10^3 \cdot 19,95}{17 \cdot 10^{-3}} = 292 \text{ (МПа)}.$$

Те саме в рівні низу фрагментів стінки товщиною 16, 14 та 13 мм відповідно:

$$\sigma_{k2} = \frac{227,6 \cdot 10^3 \cdot 19,95}{16 \cdot 10^{-3}} = 284 \text{ (МПа)}; \quad \sigma_{k3} = \frac{206,9 \cdot 10^3 \cdot 19,95}{14 \cdot 10^{-3}} = 295 \text{ (МПа)};$$

$$\sigma_{k4} = \frac{83,8 \cdot 10^3 \cdot 19,95}{13 \cdot 10^{-3}} = 129 \text{ (МПа)}.$$

### 2.2.2 Кліматичні навантаження

Б) Збір кліматичних навантажень і навантажень від власної ваги.

Навантаження від власної ваги конструкцій. На стінку в рівні днища впливає вага самої стінки, вага конструкцій майданчиків з корисними впливами, вага конструкції даху. Власна вага конструкцій в рівні днища складається з ваги бічних

стінок  $P_{g1}$ , ваги металокопструкцій даху  $P_{g2}$ , ваги сервісних кільцевих майданчиків  $P_{g3}$ .

Загальна вага металу стінки складає 265,3 т. Тоді загальна нормативна вага стінки одного резервуару в рівні днища:  $P_{g1}^H = M_{cm} \cdot g = 2,653 (MH)$ .

За специфікацією загальна вага металу покрівлі складає 108,1 т. Тоді загальна нормативна вага даху резервуару:  $P_{g2}^H = M_{dx} \cdot g = 1,081 (MH)$ .

За специфікацією загальна вага металу кільцевих майданчиків складає 26,8 т. Тоді загальна нормативна вага кільцевих майданчиків:  $P_{g3}^H = M_{nl} \cdot g = 0,268 (MH)$

Загальний осьовий тиск в металі від вказаних елементів резервуару в рівні днища:

$$P_{\Sigma g1}^H = \frac{P_{g1}^H + P_{g2}^H + P_{g3}^H}{\pi \cdot D_{en} \cdot \Delta_1} = \frac{(2,653 + 1,081 + 0,268) \cdot 10^6}{\pi \cdot 39,9 \cdot 17 \cdot 10^{-3}} = 1,879 (MПа).$$

Тиск в рівні низу фрагментів стінки товщиною 16 мм:

$$P_{\Sigma g2}^H = \frac{P_{g1}^H + P_{g2}^H + P_{g3}^H - P_{g17}^H}{\pi \cdot D_{en} \cdot \Delta_2} = 1,871 (MПа).$$

Тиск в рівні низу фрагментів стінки товщиною 14 мм:

$$P_{\Sigma g3}^H = \frac{P_{g1}^H + P_{g2}^H + P_{g3}^H - P_{g17}^H - P_{g16}^H}{\pi \cdot D_{en} \cdot \Delta_3} = 2,005 (MПа).$$

Тиск в рівні низу фрагментів стінки товщиною 13 мм:

$$P_{\Sigma g4}^H = \frac{P_{g1}^H + P_{g2}^H + P_{g3}^H - P_{g17}^H - P_{g16}^H - P_{g14}^H}{\pi \cdot D_{en} \cdot \Delta_4} = 1,402 (MПа).$$

Розрахункові тиски від тих самих впливів розраховується за формулою (2.9):

$$P_{\Sigma gi}^P = P_{\Sigma gi}^H \cdot \gamma_n^I \cdot \gamma_{fm}, \quad (2.9)$$

де  $\gamma_{fm} = 1,05$  – коефіцієнт надійності за навантаження металевих конструкцій, у яких зусилля від власної ваги менші 50% [3, с.9, табл. 5.1].

Відповідно:

$$p_{\Sigma g1}^p = 1,879 \cdot 1,25 \cdot 1,05 = 2,467 \text{ (МПа)}; \quad p_3^p = 2,005 \cdot 1,25 \cdot 1,05 = 2,632 \text{ (МПа)};$$

$$p_{\Sigma g2}^p = 1,871 \cdot 1,25 \cdot 1,05 = 2,456 \text{ (МПа)}; \quad p_4^p = 1,402 \cdot 1,25 \cdot 1,05 = 1,841 \text{ (МПа)}$$

Повний нормативний кільцевий тиск на конструкції днища від власної ваги конструкцій, розташованих вище днища, умовно рівномірно розподілений по довжині стінки:

$$q_{\Sigma g1}^H = p_{\Sigma g1}^H \cdot \Delta_1 = 1,879 \cdot 10^6 \cdot 17 \cdot 10^{-3} = 31,95 \text{ (кН / м)}.$$

Розрахункове (граничне) навантаження на конструкції днища від власної ваги конструкцій, розташованих вище днища, умовно рівномірно розподілене по довжині стінки:

$$q_{\Sigma g1}^p = p_{\Sigma g1}^p \cdot \Delta_1 = 2,467 \cdot 10^6 \cdot 17 \cdot 10^{-3} = 41,94 \text{ (кН / м)}.$$

Загальне експлуатаційне навантаження від всіх перелічених впливів:

$$q_{\Sigma g1}^e = q_{\Sigma g1}^H \cdot \gamma_{fe} \cdot \gamma_n^H = 31,95 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 1,05 = 33,55 \text{ (кН / м)},$$

де  $\gamma_{fe} = 1$  – експлуатаційний коефіцієнт надійності для власної ваги конструкцій, [3, п. 5.2].

Навантаження від ізоляції покрівлі та корисних навантажень на сервісні майданчики. Загальна площа сферичного сектора покрівлі

$$A_{ox} = 2 \cdot \pi \cdot R_{cf} \cdot h_{ox} = 2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 3,4 = 1282 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Загальне нормативне навантаження від ізоляції покрівлі:

$$F_{ox} = A_{ox} \cdot g_i = 1282 \cdot 1 = 1282 \text{ (кН)}.$$

Загальна площа сервісних майданчиків на відм. 16,95 м:  $A_{17} = 129 \text{ м}^2$ .

Загальне нормативне навантаження від корисного тиску на майданчик на відм. 16,95 м  $F_{17} = A_{17} \cdot p_{н17} = 129 \cdot 2 = 258$  (кН).

Загальна площа інших сервісних майданчиків на відм. 20,75 м:  $A_{20} = 116$  м<sup>2</sup>.

Загальне нормативне навантаження від корисного тиску на інші майданчики  $F_{20} = A_{20} \cdot p_{н20} = 116 \cdot 6 = 696$  (кН).

Загальне нормативне навантаження від перелічених впливів:

$$F_{кн} = F_{\partial x} + F_{17} + F_{20} = 1282 + 258 + 696 = 2236 \text{ (кН)}.$$

Нормативний тиск в рівні низу обичайки (верхній обріз днища):

$$p_{\Sigma F_n} = F_{кн} / (\pi \cdot D_{вн} \cdot \Delta_1) = 2236 / (\pi \cdot 39,9 \cdot 17 \cdot 10^{-3}) = 1,05 \text{ (МПа)}.$$

Нормативне навантаження на конструкції днища від ізоляції покрівлі та корисних тисків на сервісні площадки, умовно рівномірно розподілене по довжині стінки:  $q_{\Sigma F}^n = p_{\Sigma F_n} \cdot \Delta_1 = 1,05 \cdot 10^6 \cdot 17 \cdot 10^{-3} = 17,84$  (кН / м).

Загальне розрахункове (граничне) навантаження від всіх перелічених впливів:

$$F_{кр} = (F_{\partial x} \cdot \gamma_{fm} + F_{17} \cdot \gamma_{fm} + F_{20} \cdot \gamma_{fm}) \cdot \gamma_n^I, \quad (2.10)$$

де  $\gamma_{fm} = 1,2$  – коефіцієнти надійності відповідно для ізоляційних матеріалів та для корисних рівномірно розподілених навантажень, що прийняті у відповідності до табл. 6.1 та п. 6.7 [3].

$$F_{кр} = (1282 \cdot 1,2 + 258 \cdot 1,2 + 696 \cdot 1,2) \cdot 1,25 = 3354 \text{ (кН)}.$$

Розрахунковий (граничний) тиск в рівні низу стінки:

$$p_{\Sigma F_p} = F_{кр} / (\pi \cdot D_{вн} \cdot \Delta_1) = 3354 / (\pi \cdot 39,9 \cdot 17 \cdot 10^{-3}) = 1,58 \text{ (МПа)}.$$

Розрахункове (граничне) навантаження на конструкції днища від ізоляції покрівлі та корисних тисків на сервісні площадки, умовно рівномірно розподілене по довжині стінки:

$$q_{\Sigma F}^p = p_{\Sigma Fp} \cdot \Delta_1 = 1,58 \cdot 10^6 \cdot 17 \cdot 10^{-3} = 26,76 \text{ (кН / м)}$$

Експлуатаційне навантаження на конструкції днища від ізоляції покрівлі та корисних тисків на сервісні площадки, умовно рівномірно розподілене по довжині стінки:

$$q_{\Sigma F}^e = (F_{ox} \cdot \gamma_{fe} + F_{17} \cdot \gamma_{fe} + F_{20} \cdot \gamma_{fe}) \cdot \gamma_n^{II} / (\pi \cdot D_{вн}). \quad (2.11)$$

Підставляючи у формулу відомі величини отримуємо:

$$q_{\Sigma F}^e = (1282 \cdot 1,0 + 258 \cdot 1,0 + 696 \cdot 1,0) \cdot 1,05 / (\pi \cdot 39,9) = 18,73 \text{ (кН/м)}$$

Навантаження від ожеледі. Ожеледним впливам можуть піддаватися зовнішні поверхні металоконструкцій ємності та внутрішня поверхня даху.

Граничне розрахункове значення поверхневого ожеледного навантаження на площинні елементи (навантаження на основні несучі елементи металевого каркасу та майданчики) визначається згідно [3, п.10.4]:

$$G_m = G_e \cdot \gamma_{fm}, \text{ [Па]}, \quad (2.12)$$

де  $G_e$  – характеристичне значення ваги ожеледі,  $\gamma_{fm} = 0,887$  – коефіцієнт надійності за граничним значенням ваги ожеледі, що визначено згідно з [3, п.10.10] при терміні експлуатації 30 років.

$$G_e = b \cdot k \cdot \mu_2 \cdot \rho \cdot g, \text{ [Па]}, \quad (2.13)$$

де  $b = 24 \text{ мм}$  – товщина стінки ожеледі для м. Южне;  $k$  – коефіцієнт, який враховує зміну товщини стінки ожеледі по висоті  $h$  і приймається за [3, табл. 10.2]. При  $h \leq 5 \text{ м}$ ,  $k_5 = 0,8$ ; при  $h = 10 \text{ м}$ ,  $k_{10} = 1,0$ ; при  $h = 20 \text{ м}$ ,  $k_{20} = 1,2$ ; при  $h = 30 \text{ м}$ ,  $k_{30} = 1,4$ ;  $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$  – густина льоду;  $g = 10 \text{ м/с}^2$  – прискорення



вільного падіння;  $\mu_2$  – відношення площі поверхні елемента, що піддається обледенінню, до повної площі поверхні елемента. Для герметичної ємності в момент випробувань при заповненні морською водою ожеледь може відкладатися як ззовні, так і у середині ємності, тобто  $\mu_2 = 0,6 \cdot 2 = 1,2$  (для кришки та сервісних майданчиків) та  $\mu_2 = 0,6$  (для бічної стінки, оскільки внутрішній бік стінки омивається водою).

Для стінки нормативний тиск  $G_{e1} = 24 \cdot 10^{-3} \cdot k \cdot 0,6 \cdot 900 \cdot 10 = 130 \cdot k$ ; для даху та площадок  $G_{e2} = 24 \cdot 10^{-3} \cdot k \cdot 1,2 \cdot 900 \cdot 10 = 260 \cdot k$ .

За інтерполяцією  $k_{17,23} = 1,145$ ,  $k_{19,72} = 1,195$ ,  $k_{21,03} = 1,221$ ,  $k_{23,12} = 1,263$ .

Загальна нормативна вага криги, що відклалася на металоконструкціях ємності:

$$F_{\Sigma ice}^H = F_{cm\ ice} + F_{\partial x\ ice} + F_{nl\ ice}, \text{ [кН]}, \quad (2.14)$$

де  $F_{cm\ ice} = G_{e1} \cdot A_{cm} = 130 \cdot \pi \cdot D_{\partial n} \cdot \sum k_i \cdot h_i$ , – вага ожеледі на стінці;

$$\begin{aligned} F_{cm\ ice} &= 130 \cdot \pi \cdot D_{\partial n} \cdot \left( k_5 \cdot (5 - 1,83) + \frac{k_5 + k_{10}}{2} \cdot (10 - 5) + \frac{k_{19,72} + k_{10}}{2} \cdot (19,72 - 10) \right) = \\ &= 130 \cdot \pi \cdot 39,9 \cdot \left( 0,8 \cdot 3,17 + \frac{0,8 + 1}{2} \cdot 5 + \frac{1,195 + 1}{2} \cdot 9,72 \right) = 289 \text{ (кН)}. \end{aligned}$$

$$F_{\partial x\ ice} = G_{e2} \cdot A_{\partial x} = 260 \cdot \frac{(1,195 + 1,263)}{2} \cdot 1282 = 410 \text{ (кН)} \text{ – вага ожеледі на даху;}$$

$$F_{nl\ ice} = G_{e2} \cdot (A_{17} + A_{20}) = 260 \cdot (129 \cdot 1,145 + 116 \cdot 1,221) = 75,3 \text{ (кН)} \text{ – вага ожеледі}$$

на майданчиках ємності.

$$\text{Звідки: } F_{\Sigma ice}^H = 289 + 410 + 75,3 = 774,3 \text{ (кН)}.$$

Таким чином, граничний розрахунковий тиск від ожеледі в основі стінки:

$$p_{ice}^p = \frac{F_{\Sigma ice}^n \cdot \gamma_{fm} \cdot \gamma_n^I}{D_{en} \cdot \Delta_1} = \frac{774,3 \cdot 10^3 \cdot 0,887 \cdot 1,25}{39,9 \cdot 17 \cdot 10^{-3}} = 1,27 \text{ (МПа)}.$$

Розрахункове (граничне) навантаження на конструкції днища від впливу ожеледі, умовно рівномірно розподілене по довжині стінки:

$$q_{ice}^p = p_{ice}^p \cdot \Delta_1 = 1,27 \cdot 10^6 \cdot 17 \cdot 10^{-3} = 21,52 \text{ (кН / м)}.$$

Експлуатаційний тиск від крижаної кірки в основі стінки:

$$p_{ice}^e = \frac{F_{\Sigma ice}^n \cdot \gamma_{fm} \cdot \gamma_n^{II}}{D_{en} \cdot \Delta_1} = \frac{774,3 \cdot 10^3 \cdot 0,887 \cdot 1,05}{39,9 \cdot 17 \cdot 10^{-3}} = 1,07 \text{ (МПа)}.$$

Експлуатаційне навантаження на конструкції днища від впливу ожеледі, умовно рівномірно розподілене по довжині стінки:

$$q_{ice}^e = p_{ice}^e \cdot \Delta_1 = 1,07 \cdot 10^6 \cdot 17 \cdot 10^{-3} = 18,19 \text{ (кН / м)}.$$

Граничне розрахункове значення нормального тиску вітру на покритті ожеледдю елементи визначається згідно [3, п.10.8]:

$$W_q = W_B \cdot \gamma_{fw}, \text{ [кПа]}, \quad (2.15)$$

де  $\gamma_{fw} = 0,87$  – коефіцієнт надійності за граничним значенням нормального тиску вітру на покритті ожеледдю елементи, що визначено згідно з [3, п.10.11] при терміні експлуатації 30 років;  $W_B = 0,31 \text{ кПа}$  – значення вітрового тиску на покритті ожеледдю елементи для м. Южне.

Таким чином  $W_q = 0,31 \cdot 0,87 = 0,270 \text{ (кПа)}$ .

Навантаження від снігу. Граничне розрахункове снігове навантаження на покрівлю для 2-го снігового району згідно з [3, с.20] визначається за (2.16):

$$S_m = \gamma_{fm} \cdot S_0 \cdot C, \text{ [кПа]}. \quad (2.16)$$

де  $\gamma_{fm} = 0,895$  – коефіцієнт надійності за граничним розрахунковим значенням снігового навантаження для 30-річного терміну експлуатації;

$S_0 = 870 \text{ Па}$  – характеристичне значення снігового навантаження [3, с.53];  
 $C = \mu \cdot C_e \cdot C_{alt} = 1 \cdot 1 \cdot 1 = 1$  – коефіцієнт;  $C_e = 1$  – не експлуатована покрівля;  $C_{alt} = 1$  – коефіцієнт географічної висоти;  $\mu = 1$  – коефіцієнт переходу від поверхні ґрунту до покрівлі, при кутах менше  $25^\circ$  (ухил сферичної покрівлі  $\alpha = 0 \dots 18^\circ$ ).

Експлуатаційний сніговий тиск обчислюється за формулою (2.17):

$$S_e = \gamma_{fe} \cdot S_0 \cdot C, \text{ [кПа]}, \quad (2.17)$$

де  $\gamma_{fe} = 0,49$  – коефіцієнт надійності за експлуатаційним значенням снігового навантаження при періоді повторюваності  $\eta = 0,02$  [3, табл. 8.3].

Граничний розрахунковий тиск від снігового навантаження на сферичний дах та майданчики в рівні 16,95 м:  $S_m = 0,895 \cdot 870 \cdot 1 = 0,779 \text{ (кПа)}$ .

Експлуатаційний сніговий тиск:  $S_e = 0,49 \cdot 870 \cdot 1 = 0,427 \text{ (кПа)}$ .

Загальна площа покрівлі у проекції на горизонтальну площину:

$$A_{\text{ох0}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{вн}}^2}{4} = \frac{\pi \cdot 39,9^2}{4} = 1251 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Рівнодійна розрахункових навантажень на дах і майданчики в рівні 16,95 м:

$$F_{sm} = (A_{\text{ох0}} + A_{17}) \cdot S_m \cdot \gamma_n^I = (1251 + 129) \cdot 0,779 \cdot 1,25 = 1344 \text{ (кН)}.$$

Рівнодійна експлуатаційних навантажень на дах і майданчики буде:

$$F_{se} = (A_{\text{ох0}} + A_{17}) \cdot S_e \cdot \gamma_n^{II} = (1251 + 129) \cdot 0,427 \cdot 1,05 = 619 \text{ (кН)}.$$

Розрахунковий (граничний) тиск в рівні низу стінки від снігових впливів:

$$p_{sm} = F_{sm} / (\pi \cdot D_{\text{вн}} \cdot \Delta_1) = 1344 / (\pi \cdot 39,9 \cdot 17 \cdot 10^{-3}) = 0,63 \text{ (МПа)}.$$

Розрахункове (граничне) навантаження на конструкції днища від снігових впливів, умовно рівномірно розподілене по довжині стінки:

$$q_s^p = p_{sm} \cdot \Delta_1 = 0,63 \cdot 10^6 \cdot 17 \cdot 10^{-3} = 10,72 \text{ (кН / м)}.$$

Експлуатаційний тиск в рівні низу обичайки (верхній обріз днища) від снігових впливів:  $p_{se} = F_{se} / (\pi \cdot D_{\text{вн}} \cdot \Delta_1) = 619 / (\pi \cdot 39,9 \cdot 17 \cdot 10^{-3}) = 0,29 \text{ (МПа)}$ .

Експлуатаційне навантаження на конструкції даху від снігових впливів, умовно рівномірно розподілене по довжині стінки:

$$q_s^e = p_{se} \cdot \Delta_1 = 0,29 \cdot 10^6 \cdot 17 \cdot 10^{-3} = 4,94 \text{ (кН / м)}.$$

Навантаження від вітру погіршує стійкість стінок ємності при вакуумі, створюють радіальні стискаючі напруження в стінці ємності, а також призводить до появи згинального моменту в рівні фундаментів, та зсуваючої горизонтальної сили.

Граничне розрахункове вітрове навантаження згідно з [3, с.24] визначається за формулою (2.18):

$$W_m = \gamma_{fm} \cdot W_0 \cdot C, \text{ [кПа]}, \quad (2.18)$$

де  $W_0 = 0,49 \text{ кПа}$  – характеристичне значення вітрового тиску для м. Южне;  $\gamma_{fm} = 0,89$  – коефіцієнт надійності за граничним значенням вітрового навантаження (прийнято за терміном експлуатації споруди – 30 років, [3 табл. 9.1]).

Приймаємо до розрахунку тип місцевості I (відкриті поверхні морів, озер, а також плоскі рівнини без перешкод на ділянці довжиною не менше 3 км).

Вітрове навантаження на елементи ємності задається змінним по висоті

$C$  – коефіцієнт, що визначається за формулою (2.19):

$$C = C_{aer} \cdot C_h \cdot C_{alt} \cdot C_{rel} \cdot C_{dir} \cdot C_d, \quad (2.19)$$

де  $C_{aer}$  – аеродинамічний коефіцієнт;  $C_h = 1,4 \dots 1,95$  – коефіцієнт висоти споруди, визначається за табл. 9.02 Зміни №1 до [3] для типу місцевості I;  $C_{alt} = 1$  – коефіцієнт географічної висоти, оскільки  $H < 0,5 \text{ км}$ ;  $C_{dir} = 1$  – коефіцієнт напрямку (для симетричних оболонок обертання);  $C_{rel} = 1$  – коефіцієнт рельєфу (для рівнинної місцевості);  $C_d = 1$  – коефіцієнт динамічності (згідно зі змінами № 1 до [3] від 1 жовтня 2007 року).

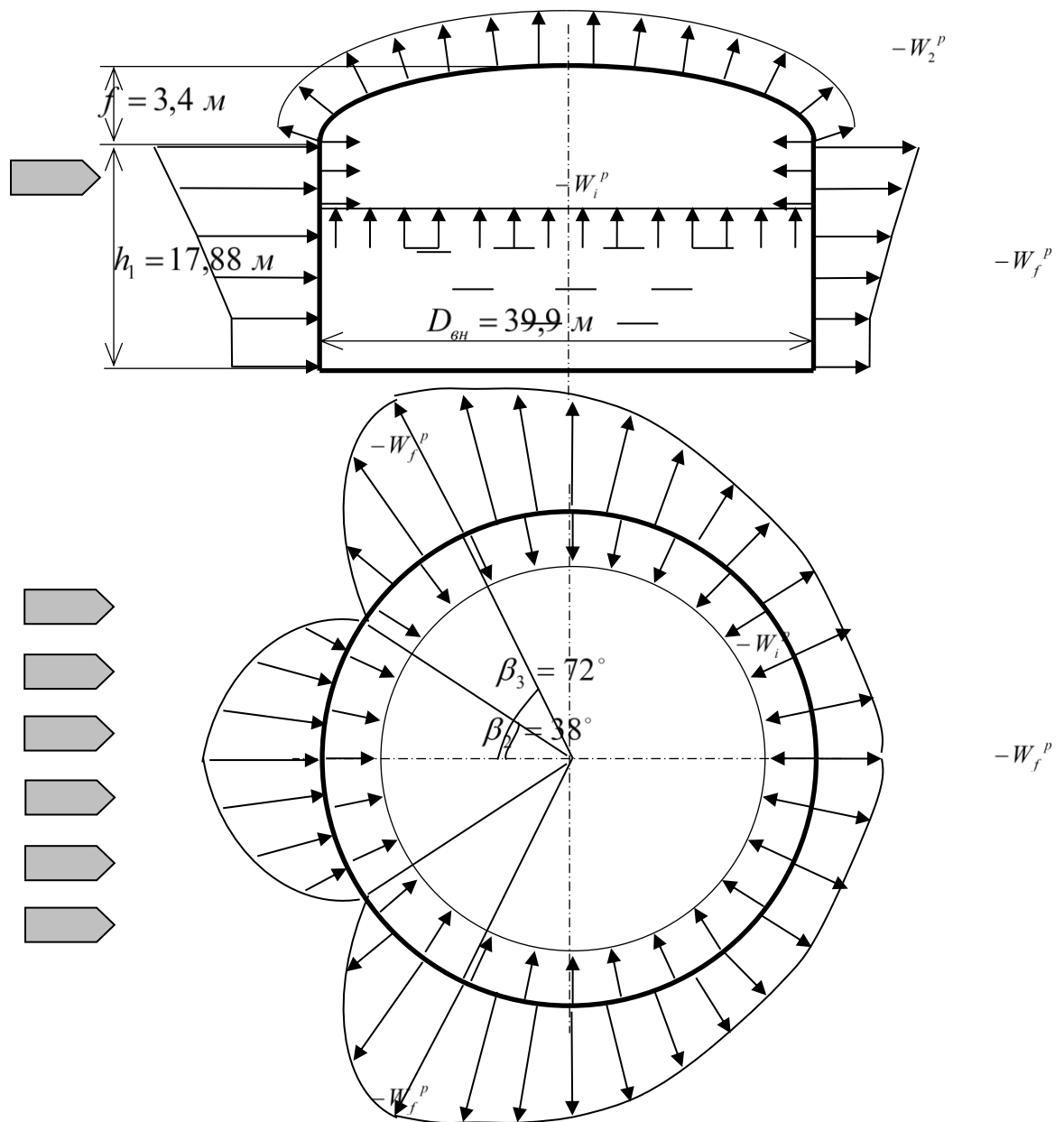


Рисунок 2.5 – Розподіл вітрового тиску та вакууму при вітру на конструкції ємності

Оскільки число Рейнольдса:

$$Re = 0,88 \cdot D_{\text{вн}} \cdot \sqrt{W_0 \cdot k(z) \cdot \gamma_f} = 0,88 \cdot 39,9 \cdot \sqrt{490 \cdot 1,94 \cdot 0,89} = 130 \cdot 10^8 \gg 4 \cdot 10^5,$$

аеродинамічний коефіцієнт  $C_{aer}$  визначається за формулою (2.20).

$$C_{aer} = k \cdot C_\beta, \quad (2.20)$$

де  $C_\beta$  – коефіцієнт, що визначається за графіком [3 с. 68].

З формули (2.19) та (2.20) випливає  $C = C_{aer} \cdot C_h \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = C_{aer} \cdot C_h$ .

Для припливної складової  $+C_{aer} = 1 \cdot 1 = 1$ ; для віддтоку  $-C_{aer} = -1,3 \cdot 0,883 = -1,148$ . Для вакууму всередині ємності  $-C_{aer}^i = 0,670$ , для вакууму над сферичним дахом  $-C_{aer}^2 = 0,368$ .

Граничний розрахунковий тиск від вітрового впливу з урахуванням коефіцієнта надійності  $\gamma_n^I = 1,25$  розраховується за формулою (2.21):

$$W_f^p = W_m \cdot \gamma_n^I = \gamma_{fm} \cdot W_0 \cdot C_{aer} \cdot C_h \cdot \gamma_n^I, [\text{кПа}]. \quad (2.21)$$

Підставляючи відомі величини у формулу (2.21) отримуємо вираз для визначення  $W_f^p = W_m \cdot \gamma_n^I = 0,89 \cdot 0,49 \cdot C_{aer} \cdot C_h \cdot 1,25 = 0,545 \cdot C_{aer} \cdot C_h, [\text{кПа}]$ .

Результати розрахунку вітрового навантаження на конструкції ємності дивись табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Вітрове навантаження (статичне) на металоконструкції ємності

Ділянка по висоті, м	$C_h$	Коефіцієнти аеродинамічності, що характеризує				Вітровий тиск та вакуум, кПа			
		Тиск на обичайку		Вакуум над дахом та рідиною		Тиск		Вакуум	
		$+C_{aer}$	$-C_{aer}$	$-C_{aer}^i$	$-C_{aer}^2$	$+W_f^p$	$-W_f^p$	$-W_i^p$	$-W_2^p$
1,83 (цоколь)	1,40	1	-1,148	-0,67	-0,368	0,763	-0,876	-0,708	0
5	1,40	1	-1,148	-0,67	-0,368	0,763	-0,876	-0,708	0
10	1,80	1	-1,148	-0,67	-0,368	0,981	-1,126	-0,708	0
19,44 (верхній обріз)	1,94	1	-1,148	-0,67	-0,368	1,054	-1,214	-0,708	-0,389
20	1,95	1	-1,148	-0,67	-0,368	1,063	-1,220	-	-

Обчислимо результуючі зсувної сили, підйомної сили та згинального моменту від вітрових впливів. Епюра горизонтальних тисків та відтоку на стінки ємності зображені на рис. 2.1. Епюра результуючих впливів у проекції на горизонтальну вісь в рівні цоколя показаний на рис. 2.2. Складаючи епюри з навітряного та підвітряного боків, отримуємо результуючу вітрову силу на  $\Delta h_i = 1$  м висоти ємності від днища  $F_{wi}$ .

Загальний результуючий вітровий вплив, що зсуває ємність по поверхні фундаментів в бік вектору вітрового впливу, обчислюємо за формулою:

$$Q_{wf} = \sum_{i=1}^n F_{wi} \cdot \Delta h_i = 0,420 \text{ (MH)}.$$

Площа сферичного даху:  $A_{\text{ох}} = 1282 \text{ (м}^2\text{)}$ . Площа проекції даху на горизонтальну площину  $A_{\text{ох0}} = 1251 \text{ (м}^2\text{)}$ . Звідки, підйомна сила, що намагається відірвати дах від стінки, буде рівною:

$$F_{w2} = -W_2^p \cdot A_{\text{ох0}} = -0,389 \cdot 1251 = -0,487 \text{ (MH)}.$$

Згинальний момент від вітрових впливів, прикладених до бічної поверхні стінки буде рівний:

$$M_{wf} = Q_{wf} \cdot h_Q = 0,420 \cdot 9,75 = 4,095 \text{ (MH} \cdot \text{м)}.$$



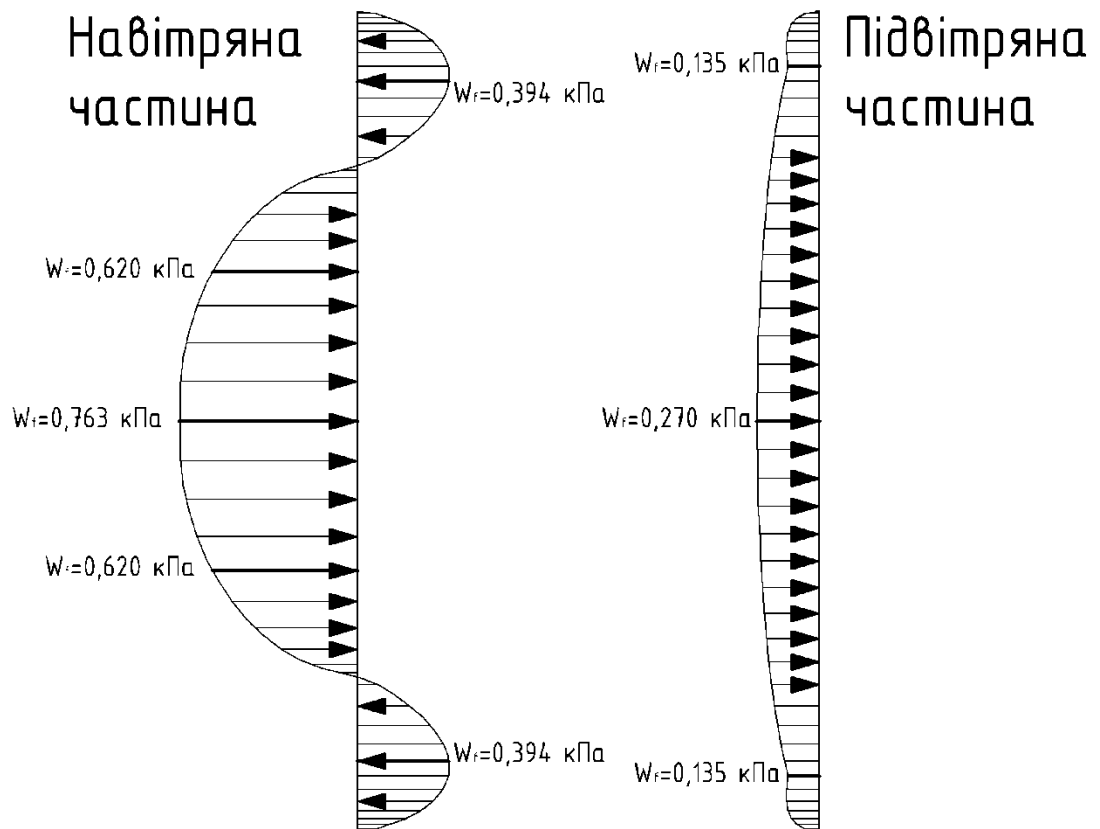


Рисунок 2.6 – Епюра горизонтальних тисків та відтоку на стінки ємності в рівні цоколя в проекції на вертикальну площину симетрії ємності

### 2.2.3 Вплив вакууму на герметичні резервуари

Одним з найбільш небезпечних факторів, що впливає на тонкостінні металеві резервуари є вплив вакууму.

### 2.2.4 Аварійні сейсмічні впливи

У розрахунку металевих тонкостінних ємностей на сейсмічні впливи необхідно визначити висоту збуреної струсом хвилі та порівняти її з допустимою висотою хвилі. Також необхідно врахувати гідродинамічні компоненти інерційних впливів від корисного заповнення ємностей. Розрахунок міцності стінок та стійкості від перекидання споруди потрібно проводити за умови нормальної експлуатації. Для конкретного прикладу ємності, побудованої у м. Южне, взятого як приклад, необхідно розглянути аварійну розрахункову ситуацію

сейсмічного впливу магнітудою 8 балів в момент наповнення ємності до рівня 11 м від рівня днища з надлишковим тиском 400 мм вод. Враховуючи характер заповнення ємності метанолом, потрібно використовувати критерії стійкості від перекидання та розглядати найбільш небезпечну ситуацію, коли один з горизонтальних напрямних косинусів рівний 1, а вертикальний напрямний косинус рівний нулю [1, 5].

Сумісна дія від корисного заповнення (метанолу) на стінки резервуару при сейсмічних впливах буде складатися з наступних навантажень:

- гідростатичного тиск продукту та навантаження від надлишкового тиску;
- імпульсивної складової гідростатичного тиску  $p_i$ ;
- конвективної складової гідростатичного тиску  $p_c$ .

Імпульсивна складова виникає від частини рідини (метанолу), що під час струсів рухається разом зі стінками резервуару.

Вимушені коливання рідини (метанолу) всередині резервуару, що призводять до появи хвиль на її поверхні, утворюють конвективний тиск.

За відсутності достовірної нормативної методики для оцінки сейсмічних впливів на будівельні конструкції резервуару, використаємо методику, викладену у [12].

#### **А) Оцінка висоти збуреної хвилі.**

Повна маса рідини (метанолу, густиною  $\rho$ ) у ємності, з урахуванням заповнення на граничну висоту  $h_{pu} = 11$  м:

$$m = \frac{\rho \cdot \pi \cdot h_{pu} \cdot D_{вн}^2}{4} = \frac{792 \cdot \pi \cdot 11 \cdot 39,9^2}{4} = 10\,893 \text{ (м)}.$$

Співвідношення висоти рідини до діаметра основи:

$$\gamma = h_{pu} / D_{вн} = 11 / 39,9 = 0,276.$$

Імпульсивна маса рідини (метанолу) за [12, формула (7.4)]:

$$m_i = \frac{th(0,866/\gamma)}{0,866/\gamma} \cdot m, [\text{T}] \quad (2.22)$$

$$m_i = \frac{th(0,866/0,276)}{0,866/0,276} \cdot 10\,893 \cdot 10^3 = 3458,63 \text{ (m)}.$$

Висота імпульсивної маси без урахування тиску на днище при  $\gamma = 0,276 < 0,75$  [12, формула (7.5)]:

$$h_i^* = 0,375 \cdot h_{pu}, [\text{M}]. \quad (2.23)$$

$$h_i^* = 0,375 \cdot h_{pu} = 0,375 \cdot 11 = 4,125 \text{ (m)}.$$

Вага будівельних конструкцій ємності та ізоляції:

$$m_s = M_{cm} + M_{\partial x} + M_{\partial n} + M_{nl} + \frac{F_{\partial x}}{g}, [\text{T}] \quad (2.24)$$

$$m_s = (736,3 + 324,5) + 432,2 + 283,1 + 106,9 + \frac{1282}{10} = 2011,2 \text{ (m)}.$$

Скорегована імпульсивна маса з урахуванням ваги ємності та ізоляції:

$$m_i^{corr} = m_i + m_s. \quad (2.25)$$

$$m_i^{corr} = 3458,63 + 2011,2 = 5469,83 \text{ (m)}.$$

Центр мас ємності знаходиться на відмітці  $h_s$  від верхнього обрізу фундаментів, яку можна обчислити за формулою:

$$h_s = \frac{M_{cm} \cdot h_{cm} + M_{\partial x} \cdot h_{\partial x} + M_{\partial n} \cdot h_{\partial n} + M_{nl} \cdot h_{nl} + F_{\partial x} \cdot h_{\partial x} / g}{m_s}, [\text{M}], \quad (2.26)$$

де  $h_{cm} = 8,540 \text{ м}$ ,  $h_{\partial x} = 19,488$ ,  $h_{\partial n} = 0,039 \text{ м}$ ,  $h_{nl} = 17,300 \text{ м}$  відповідно висота центра мас стінки (обичайки), даху, днища та площадок над рівнем верхнього обрізу фундаментів.

$$h_s = \frac{(736,3 + 324,5) \cdot 8,54 + (432,2 + 128,2) \cdot 19,488 + 283,1 \cdot 0,039 + 106,9 \cdot 17,3}{2011,2} = 10,86 \text{ (м)}$$

Скорегована висота прикладання імпульсивної складової маси рідини обчислюється за [12, формула (7.8)]:

$$h_i^{corr*} = \frac{m_i \cdot h_i^* + m_s \cdot h_s}{m_i + m_s}, \text{ [М]}. \quad (2.27)$$

$$h_i^{corr*} = \frac{3458,63 \cdot 4,125 + 2011,2 \cdot 10,86}{3458,63 + 2011,2} = 6,6 \text{ (м)}.$$

Конвективна маса рідини, яка коливається незалежно від ємності та збурює хвилю, обчислюється за [12, формула (7.10)]:

$$m_c = \frac{0,23}{\gamma} \cdot th(3,68 \cdot \gamma) \cdot m. \quad (2.28)$$

$$m_c = \frac{0,23}{0,276} \cdot th(3,68 \cdot 0,276) \cdot 10\,893 \cdot 10^3 = 6972,44 \text{ (т)}.$$

Жорсткість умовних пружних зв'язків між конвективною масою та стінкою ємності [5]:

$$K_c = \frac{0,846 \cdot m \cdot g}{h_{pu}} \cdot th^2(3,68 \cdot \gamma), \left[ \frac{\text{МН}}{\text{м}} \right] \quad (2.29)$$

$$K_c = \frac{0,846 \cdot 10\,893 \cdot 10^3 \cdot 10}{11} \cdot th^2(3,68 \cdot 0,276) = 4,943 \left( \frac{\text{МН}}{\text{м}} \right).$$

Висота прикладання конвективної маси за [5]:

$$h_c^* = \left( 1 - \frac{ch(3,68 \cdot \gamma) - 1}{3,68 \cdot \gamma \cdot sh(3,68 \cdot \gamma)} \right) \cdot h_{pu}. \quad (2.30)$$

$$h_c^* = \left( 1 - \frac{ch(3,68 \cdot 0,276) - 1}{3,68 \cdot 0,276 \cdot sh(3,68 \cdot 0,276)} \right) \cdot 11 = 5,929 \text{ (м)}.$$

Оціночне значення періоду першої форми власних коливань конвективної маси рідини (метанолу) можна обчислити за [5]:

$$T_j^c = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{3,68 \cdot \frac{g}{D_{\text{вн}}} \cdot th(3,68 \cdot \gamma)}}, [\text{с}]. \quad (2.31)$$

У випадку сейсмічного впливу у напрямку осі  $Ox$ :

$$T_j^c = T_X^c = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{3,68 \cdot \frac{10}{39,9 \cdot 10^3} \cdot th(3,68 \cdot 0,276)}} = 7,465 (\text{с}).$$

Максимальна висота збуреної хвилі може бути обчислена за [5]:

$$d_j^{\text{max}} = 0,42 \cdot \frac{D_{\text{вн}} \cdot A_j^{c \text{max}}}{g}, [\text{м}], \quad (2.32)$$

де  $A_j^{c \text{max}} = A_{\text{hor}}^{\text{max}} \cdot \beta(T_j^c) \cdot K_I \cdot K_{\Psi}^c$  – максимальне розрахункове прискорення для конвективної маси в напрямку  $j$ ;  $K_I = 0,5$  – коефіцієнт, що враховує непружні деформації ємності для прийнятої категорії сейсмостійкості ІІс, [12, п. 5.13],  $\beta(T_j^c)$  – коефіцієнт динамічності.

У першому наближенні у випадку сейсмічного впливу в напрямку осі  $Ox$  за [5]:

$$A_j^c = A_X^c = A_{\text{hor}}^{\text{max}} \cdot \beta(T_X^c) \cdot K_I \cdot K_{\Psi}^c, [\text{м}/\text{с}^2]. \quad (2.33)$$

Де: верхня та нижня оціночні межі коефіцієнта розсіювання енергії  $K_{\Psi}^c$ :  $K_{\Psi}^{c \text{max}} = 2,16$  – при відсутності точних даних про коефіцієнт демпфування прийнято для відносного демпфування  $\xi = 0,005$  [12, табл. 5.4], верхня оціночна межа за рекомендаціями [12, п. 5.12],  $K_{\Psi}^{c \text{min}} = 0,65$  – при  $\xi = 0,2$  [12, табл. 5.4], – нижня оціночна межа,  $A_{\text{hor}}^{\text{max}} = 2,0 \text{ м}/\text{с}^2$  – максимальне прискорення при землетрусі магнітодою 8 балів [12, п. 5.9],

$$\beta(T_X^c) = \beta(T_X^c = 7,465 \text{ c}) = \max \left\{ 2,5 \cdot \sqrt{\frac{0,8}{T_X^c}}; 0,8 \right\} \quad (\text{для II категорії ґрунтів за}$$

сейсмічними властивостями) [12, табл. 5.1];

$$\beta(T_X^c) = \max \left\{ 2,5 \cdot \sqrt{\frac{0,8}{7,465}} = 0,818; 0,8 \right\} = 0,818;$$

$A_X^{c \max} = 2,0 \cdot 0,818 \cdot 0,5 \cdot 2,16 = 1,767 \text{ (м/с}^2\text{)}$  – верхня оціночна межа сейсмічного прискорення.

$A_X^{c \min} = 2,0 \cdot 0,818 \cdot 0,5 \cdot 0,65 = 0,532 \text{ (м/с}^2\text{)}$  – нижня оціночна межа сейсмічного прискорення.

Максимально можлива висота хвилі при максимальному сейсмоприскоренні:

$$d_j^{\max} = d_X^{\max} = 0,42 \cdot \frac{D_{\text{вн}} \cdot A_X^{c \max}}{g} = 0,42 \cdot \frac{39,9 \cdot 1,767}{10} = 2,961 \text{ (м)}.$$

Максимальна висота хвилі при мінімальному сейсмоприскоренні:

$$d_j^{\min} = d_X^{\min} = 0,42 \cdot \frac{D_{\text{вн}} \cdot A_X^{c \min}}{g} = 0,42 \cdot \frac{39,9 \cdot 0,532}{10} = 0,892 \text{ (м)}.$$

Сума висот рівня рідини (метанолу)  $h_{pu}$  та максимального значення висоти хвилі  $d_j^{\max}$ :  $h_{pu} + d_j^{\max} = 11,0 + 2,961 = 13,961 \text{ (м)} < H_c = 17,89 \text{ м}$ . Умову виконано.

Поява хвилі не призводить до гідравлічного удару по внутрішній поверхні даху ємності. Для встановленої на поверхні землі ємності період коливань обчислюється за [12, формула А.2]

$$T_j^i = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m_i}{K_{c,j}}}, \text{ [с]}, \quad (2.35)$$

де  $K_{c,j}$  – умовна жорсткість фіктивної пружини, що відповідає спільним коливанням рідини та корпусу ємності, яка обчислюється за [12, формула (А.3)].

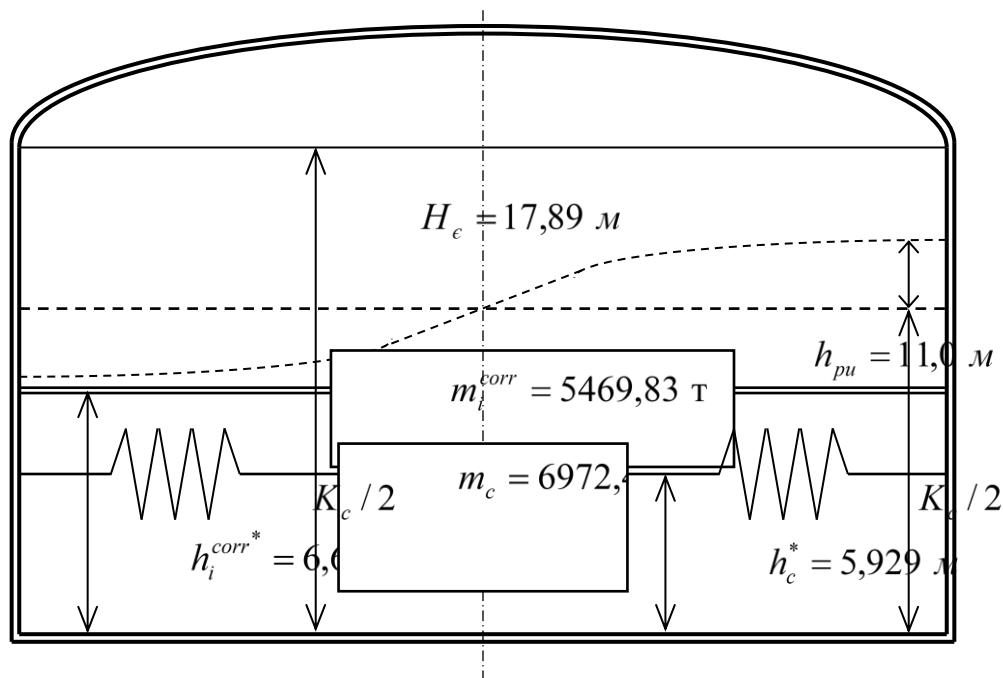


Рисунок 2.7 – Спрощена модель циліндричної ємності при розрахунку на сейсмічні впливи

$$K_{c,j} = m_i \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi}{D_{\text{вн}}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta_c \cdot E}{h_{pi} \cdot \rho}} \cdot (0,46 - 0,3 \cdot \gamma + 0,067 \cdot \gamma^2) \right)^2, \left[ \frac{MH}{m} \right]. \quad (2.36)$$

Підставляючи відомі величини у вираз (2.36) отримуємо:

$$\begin{aligned} K_{c,j} &= 3458,63 \cdot 10^3 \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi}{39,9} \cdot \sqrt{\frac{14,08 \cdot 10^{-3} \cdot 2,06 \cdot 10^{11}}{11,0 \cdot 792}} \cdot (0,46 - 0,3 \cdot 0,276 + 0,067 \cdot 0,276^2) \right)^2 = \\ &= 4173,36 (MH / m). \end{aligned}$$

Підставляючи відомі величини у формулу (2.35) отримуємо оціночне значення періоду власних коливань імпульсивної маси при впливі землетрусів:

$$T_j^i = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{3458,63 \cdot 10^3}{4173,36 \cdot 10^6}} = 0,18 (с).$$

Б) Оцінка гідродинамічного тиску на стінки.

Загальний надлишковий тиск на стінки ємності на відмітці  $z$  від імпульсивної та конвективної складових маси рідини (метанолу) визначається за [5]:

$$P_j = \sqrt{P_j^i(z) + P_j^c(z)}, \text{ [кПа]}, \quad (2.37)$$

де  $P_j^i(z) = 0,866 \cdot A_{j,1}^i \cdot h_{pu} \cdot \rho \cdot th\left(\frac{0,866 \cdot D_{ен}}{h_{pu}}\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{z}{h_{pu}}\right)^2\right)$  – імпульсивний

тиск на стінки, [5];

$$P_j^c(z) = 0,375 \cdot A_j^c \cdot D_{ен} \cdot \rho \cdot \frac{ch\left(3,674 \cdot \frac{z}{D_{ен}}\right)}{ch\left(3,674 \cdot \frac{h_{pu}}{D_{ен}}\right)} - \text{конвективний тиск на стінки, [5]}.$$

При  $z > h_{pu}$ ,  $P_j = 0$ , тобто вплив від збуреної хвилі на ділянки стінок ємності вище  $h_{pu} = 11$  м не враховується.

У першому наближенні у випадку сейсмічного впливу в напрямку осі  $Ox$  для 1-ої форми коливань ємності:

$$A_{j,k}^i = A_{X,1}^i = A_{hor}^{\max} \cdot \beta(T_{X,1}^i) \cdot K_I \cdot K_{\Psi}^i, \text{ [м/с}^2\text{]}. \quad (2.38)$$

де  $K_{\Psi}^i(\xi_i = 0,04) = 1,30$  – коефіцієнт урахування імпульсивного демпфування споруди (коефіцієнт розсіювання енергії), верхня оціночна межа за [5];  $\beta(T_X^i) = \beta(T_X^i = 0,18 \text{ с}) = 2,5$  (для II категорії ґрунтів за сейсмічними властивостями) [12, табл. 5.1];  $A_{X,1}^{\max} = 2,0 \cdot 2,5 \cdot 0,5 \cdot 1,3 = 3,25 \text{ (м/с}^2\text{)}$  – верхня оціночна межа сейсмічного прискорення при першій формі коливань ємності.

$$P_j^i(z) = 0,866 \cdot 3,25 \cdot 11 \cdot 792 \cdot th\left(\frac{0,866 \cdot 39,9}{11}\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{z}{11}\right)^2\right) = 24,43 \cdot \left(1 - \left(\frac{z}{11}\right)^2\right), \text{ (кПа)}.$$



$$P_j^c(z) = 0,375 \cdot 1,767 \cdot 39,9 \cdot 792 \cdot \frac{ch\left(3,674 \cdot \frac{z}{39,9}\right)}{ch\left(3,674 \cdot \frac{11}{39,9}\right)} = 13,44 \cdot ch\left(\frac{z}{10,86}\right), \text{ (кПа)}.$$

Розрахунковий гідростатичний тиск рідини (метанолу) при сейсміці на бічну стінку ємності з урахуванням надлишкового тиску інертного газу (азоту) можна обчислити за формулою (2.39):

$$p_a^p = (\rho \cdot g \cdot (z - h_{pu}) \cdot \gamma_{fm1} + \gamma_{fm2} \cdot p_n) \cdot \gamma_n^{Ia}, \text{ [кПа]}. \quad (2.39)$$

Підставляючи відомі величини у формулу (2.39) отримуємо:

$$p_a^p = (792 \cdot 10 \cdot (z - 11) \cdot 1,1 + 1,2 \cdot 4 \cdot 10^3) \cdot 1,05 = 9,148 \cdot (z - 11) + 5,04, \text{ (кПа)}$$

Чисельні дані гідродинамічних тисків  $P_{j=x}^i(z)$ ,  $P_{j=x}^c(z)$ ,  $P_{j=x}(z)$  та гідростатичного тиску з надлишковим тиском азоту на стінки ємності при сейсміці для  $z = [0, h_{pu}]$  зведені до табл. 2.2.

Розрахунковий загальний гідродинамічний тиск  $P_{j=x}(z)$  спрямований у напрямку умовної осі споруди  $0x$  (тобто в перерізі ємності  $z0x$ ). Схема прикладання гідродинамічних тисків до стінок ємності показана на рис. 2.8.

Таблиця 2.2 – Тиск на бічну стінку ємності при сейсміці

Рівень	Відстань від рівня днища, м	Товщина стінки, мм	Сейсмічний гідродинамічний тиск, кПа			Гідростатичний тиск, кПа
			Імпульсивний	Конвективні	Загальний	
	$z$	$\Delta_i$	$P_j^i(z)$	$P_j^c(z)$	$P_j(z)$	$p_a^p(z)$
1	0	17	24,43	13,44	27,88	105,66
2	1,49	16	23,98	13,56	27,55	92,03
3	2,98	14	22,64	13,95	26,59	78,40
4	4,47	14	20,39	14,59	25,08	64,77
5	5,96	14	17,26	15,51	23,20	51,14
6	7,45	14	13,22	16,72	21,32	37,51
7	8,94	14	8,29	18,25	20,05	23,88
8	10,43	14	2,47	20,12	20,27	10,25
	11,0	14	0	20,94	20,94	5,04
9	11,92	13	0	0	0	5,04
10	13,91	13	0	0	0	5,04
11	15,99	13	0	0	0	5,04
	17,89	13	0	0	0	5,04

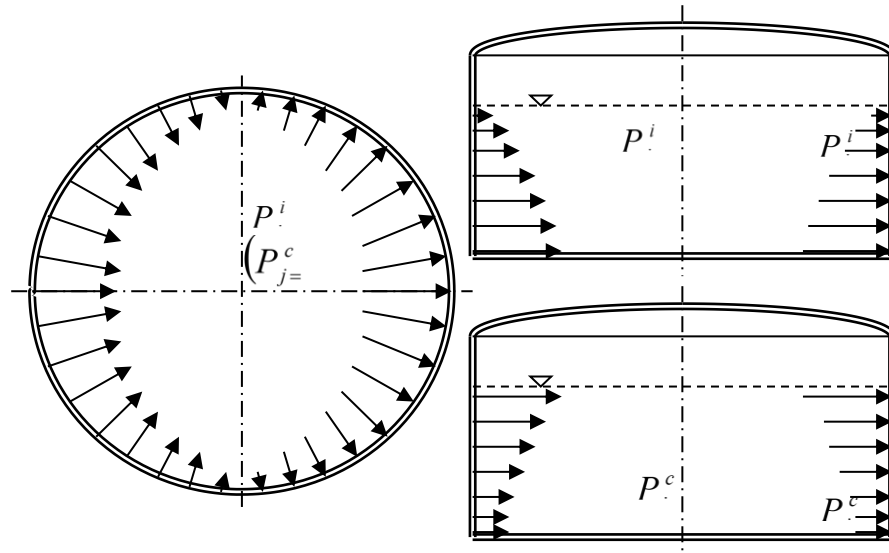


Рисунок 2.8 – Вплив гідродинамічних тисків: а – розподіл тисків у плані на відмітці  $z \leq h_{pu}$ , б – імпульсивний тиск у перерізі  $z0x$ , в – конвективний тиск у перерізі  $z0x$

### 2.2.5 Аналітична оцінка внутрішніх зусиль і напружень у конструктивних елементах резервуарів

А) Випадок не вигідного стану при радіальному розтязі елементів гідростатичним впливом при випробуваннях

В цій розрахунковій ситуації власна вага конструкцій, навантаження від снігу та ожеледі чинить стискаючий осьовий вплив на елементи ємності. Водночас, гідростатичний вплив від морської води при випробуваннях розтягує елементи ємності у радіальному напрямку. Осьові напруження розраховуємо за формулою (2.1), кільцеві – за формулою (2.2). Результати розрахунку зведено до таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Гідростатичні випробування морською водою, вага снігу та ожеледі, корисні впливи на металоконструкції ємності

Ділянка по висоті, м	Товщина стінки, мм	Гідростатичний тиск, кПа	Розрахунковий тиск від ваги конструкцій, МПа	Тиск на стінку, МПа, від		Напруження у стінці, МПа	
				Корисних впливів	Снігу	Осьові	Кільцеві
	$\Delta_i$	$p_i^p$	$p_{\Sigma gi}^p$	$p_{\Sigma Fp}$	$p_{sm}$	$\sigma_o^p$	$\sigma_k^p$
0	17	248,3	2,467	1,58	0,63	-4,68	+292
1,49	16	227,6	2,456			-4,67	+284
2,98	14	206,9	2,632			-4,84	+295
3,17	14	-	-			-	-
8,17	14	-	-			-	-
11,92	13	82,8	1,841			-4,10	+129
17,89	13	-	-			-	-

Наближені значення еквівалентних напружень за формулою (2.5) з урахуванням корозійного зносу можна розрахувати за (2.40):

$$\sigma_{екв, \max} = \sigma_{екв} \cdot \frac{\Delta_i}{\min\{\Delta_{i, \min}, S_{n, \min}\}}, \text{ [МПа]}. \quad (2.40)$$

Ступінь корозійного зносу та реальних товщин стінок споруди по відповідних рівнях беремо з джерела [1].

Для найбільш навантажених фрагментів листів обичайки (в рівні нижнього обрізу листів відповідної товщини) значення еквівалентних напружень без урахування корозійного зносу  $\sigma_{екв}$  та з урахуванням зносу  $\sigma_{екв, \max}$  зведені у табл. 2.4.

Гранично допустимі напруження в металі бічної стінки визначаємо за формулою (2.41):

$$[\sigma] = \gamma_c \cdot R_y, [\text{МПа}], \quad (2.41)$$

де  $R_y$  – розрахунковий опір прокату за даними [4, табл. Г.2],  $\gamma_{c1} = 0,7$  – коефіцієнт умов роботи стінки в рівні днища при розрахунку міцності,  $\gamma_{c2} = 0,8$  – те саме для інших елементів стінки [11, с.17, табл. 5].

Таблиця 2.4 – Результати товщинометрії та еквівалентні напруження згідно [1]

Рівень	Ділянка по висоті, м	Товщина стінки, мм [1]			Еквівалентні напруження, МПа	
		Проектна	За результатами товщинометрії		Без урахування корозійного зносу	З урахуванням корозійного зносу
			2014 р.	2018 р.		
		$\Delta_i$	$S_{n, \min}$	$\Delta_{i, \min}$	$\sigma_{екв}$	$\sigma_{екв}^{\max}$
1	0	17	15,6	16,8	294,4	320,8
2	1,49	16	15,2	15,9	286,4	301,5
3 ... 8	2,98	14	13,0	13,3	297,5	320,4
9 ... 11	11,92	13	12,1	12,5	131,1	140,9

Для сталі С 325 нижнього поясу товщиною 17 мм класу С325 з  $R_y = 315 \text{ МПа}$  за даними табл. Г.2 [4]:  $[\sigma] = 0,7 \cdot 315 = 220,5 \text{ (МПа)}$ . Співвідношення між  $\sigma_{екв}^{\max}$  та  $[\sigma]$  являється коефіцієнтом використання перерізу  $\alpha = \sigma_{екв}^{\max} / [\sigma]$ . Допустимі напруження для інших рівнів обичайки наведені у табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Визначення коефіцієнтів використання перерізу стінки

Ділянка по висоті, м	Марка сталі за проектом	Клас сталі, що відповідає марці, за [4, табл. Г.5]	Розрахунковий опір прокату за [4, табл. Г.2], МПа	Допустимі напруження, МПа	Еквівалентні напруження, з урахуванням корозійного зносу, МПа	Коефіцієнт використання перерізу
			$R_y$	$[\sigma]$	$\sigma_{екв, max}$	$\alpha$
0	09Г2С-12-1	С295	285	199,5	320,8	1,61
1,49	09Г2С-12-1	С295	285	228	301,5	1,33
2,98	09Г2С-12-1	С295	285	228	320,4	1,41
11,92	ВСтЗГпс5-1	С255	240	192	140,9	0,74

Аналізуючи чисельні дані, занотовані у табл. 2.5, можна зробити висновок, що будівельні конструкції стінки обраної споруди є перевантаженими і не можуть витримати навантаження, які виникають під час гідростатичних випробувань. Особливо важливим для міцності стінки є перший рівень листів товщиною 17 мм (перевантаження на 61%). Гранично допустима висота морської води, якою слід випробовувати ємність, обчислена зворотнім способом, рівна

$$h_{pu} \approx \frac{2 \cdot \Delta_1 \cdot 0,9 \cdot [\sigma]}{\rho_e \cdot g \cdot D_{ен} \cdot \gamma_{fml} \cdot \gamma_n^I}, [м], \quad (2.42)$$

де коефіцієнтом 0,9 враховано перехід від еквівалентних напружень до кільцевих напружень розтягу та ефекти зростання напружень внаслідок порушення геометричної форми ємності.

$$h_{pu} = \frac{2 \cdot 17 \cdot 10^{-3} \cdot 0,9 \cdot 199,5 \cdot 10^6}{1010 \cdot 10 \cdot 39,9 \cdot 1,1 \cdot 1,25} = 11,0 (м).$$

При  $h_{pu} = 11,0$  м, розрахунковий гідростатичний тиск  $p_{1u}^p = 1010 \cdot 10 \cdot 11,0 \cdot 1,1 \cdot 1,25 = 152,8$  (кПа), кільцеві розтягуючі напруження  $\sigma_{ки}^p = \frac{152,8 \cdot 10^3 \cdot 39,9}{2 \cdot 17 \cdot 10^{-3}} = 179,3$  (МПа), еквівалентні напруження  $\sigma_{екв17u} = \sqrt{(4,68^2 + 179,3^2 + (179,3 + 4,68)^2)} / 2 = 182$  (МПа), еквівалентні напруження, з урахуванням корозійного зносу  $\sigma_{екв17u}^{max} = 182 \cdot 17 / 15,6 = 198,3$  (МПа). Коефіцієнт використання перерізу  $\alpha = 198,3 / 199,5 = 0,993$ . Умова міцності забезпечена.

### Б) Небезпечний випадок радіального стиску стінок вакуумом

Радіальний стиску стінок вакуумом виникає в всередині ємності, на додачу до нього діють вакуум від вітру та осьовий стиск вагою конструкцій і сніговим впливом.

Згідно з проектними даними будівельні конструкції ємності мають витримувати розрідження (вакуум)  $p_e = -50$  мм вод. ст. =  $-0,5$  кПа. Коефіцієнт надійності за навантаженням (розрідженням)  $\gamma_{fm2} = 1,2$ . Розрахунковий вакуум:

$$p_e^p = p_e \cdot \gamma_{fm2} \cdot \gamma_n^I = -0,5 \cdot 1,2 \cdot 1,25 = -0,75 \text{ (кПа)}.$$

В результаті вітрового впливу всередині ємності може утворюватися розрідження (вакуум)  $-W_i^p = -(0,511 \dots 0,708)$  кПа.

Кільцеві стискаючі напруження обчислюємо за формулою (2.43):

$$\sigma_{\kappa}^p = \frac{(p_e^p + W_i^p) \cdot D_{вн}}{2 \cdot \Delta_c}, \text{ [МПа]}, \quad (2.43)$$

$$\text{де } \Delta_c = \frac{\sum_{i=1}^4 \Delta_i \cdot n_i}{\sum_{i=1}^4 n_i} = \frac{h_{ниж} \cdot (\Delta_1 \cdot n_1 + \Delta_2 \cdot n_2 + \Delta_3 \cdot n_3) + h_{верх} \cdot \Delta_4 \cdot n_4}{h_{ниж} \cdot (n_1 + n_2 + n_3) + h_{верх} \cdot n_4} \text{ – середня товщина}$$

стінки резервуара,  $h_{ниж} = 1,49$  м – висота поясів нижніх рівнів,  $h_{верх} = 1,99$  м – висота поясів верхніх рівнів.

$$\Delta_c = \frac{1,49 \cdot (17 \cdot 1 + 16 \cdot 1 + 14 \cdot 6) + 13 \cdot 3 \cdot 1,99}{1,49 \cdot (1 + 1 + 6) + 3 \cdot 1,99} = 14,08 \text{ (мм)}.$$

Згідно з [4, п. 14.2.5] умова стійкості замкненої циліндричної оболонки обертання, що знаходиться під впливом двох стискаючих зусиль:

$$\frac{\gamma_n}{\gamma_c} \cdot \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_{cr,1}} + \frac{\sigma_2}{\sigma_{cr,2}} \right) \leq 1. \quad (2.44)$$

Таблиця 2.6 – Вакуум, вітрове навантаження та вага снігу, що впливають на стиск стінок ємності

Ділянка по висоті, м	Товщина стінки, мм	Розрахунковий тиск від ваги конструкцій, МПа	Тиск на стінку, МПа, від		Вакуум, кПа, від		Напруження у стінці, МПа	
			Корисних впливів	Снігу	Розрідження	Вітру	Осьові	Кільцеві
0	17	2,467	1,58	0,63	-0,75	-0,708	-4,68	-3,900
1,49	16	2,456					-4,67	-3,900
2,98	14	2,632					-4,84	-3,900
11,92	13	1,841					-4,10	-3,900

Коефіцієнт  $\gamma_n$  врахований при визначенні величин  $\sigma_1$  та  $\sigma_2$ , а саме:  $\sigma_o^p = \sigma_1 \cdot \gamma_n$ ,  $\sigma_k^p = \sigma_2 \cdot \gamma_n$ . Критичні напруження при цьому позначимо  $\sigma_{cr,1} = \sigma_{o,cr}$ ,  $\sigma_{cr,2} = \sigma_{k,cr}$ . Оскільки при розрахунку стійкості  $\gamma_c = \gamma_{c3} = 1,0$ , формула (2.44) набуває вигляду:

$$\frac{\sigma_o^p}{\sigma_{o,cr}} + \frac{\sigma_k^p}{\sigma_{k,cr}} \leq 1. \quad (2.45)$$

Визначаємо співвідношення висоти резервуару до радіуса основи резервуару:



$$\frac{H_c}{r} = \frac{17,89}{19,95} = 0,892.$$

Критичні напруження в циліндричній оболонці при впливі вакууму та стиску оболонки від вітру, за умови  $0,5 < \left(\frac{H_c}{r} = 0,892\right) < 10$ , визначаються за [4]:

$$\sigma_{\kappa, cr} = 0,55 \cdot \gamma_{fm2} \cdot E \cdot \left(\frac{r}{H_c}\right) \cdot \left(\frac{\Delta_c}{r}\right)^{3/2}, \text{ [МПа]} \quad (2.46)$$

де  $E = 2,06 \cdot 10^{11} \text{ Па}$  – модуль пружності сталі [4, табл. Б.1].

Таким чином, кільцеві критичні напруження при радіальному стиску ємності від вакууму:

$$\sigma_{\kappa, cr} = 0,55 \cdot 1,2 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot \left(\frac{19,95}{17,89}\right) \cdot \left(\frac{14,08 \cdot 10^{-3}}{19,95}\right)^{3/2} = 2,834 \text{ (МПа)}.$$

Визначаємо співвідношення висоти радіуса основи резервуару до середньої товщини стінки:

$$\frac{r}{\Delta_c} = \frac{19,95}{14,08 \cdot 10^{-3}} = 1,417 \cdot 10^3 > 300.$$

Критичні напруження при впливі осьових стискаючих сил:

$$\sigma_{o, cr} = \frac{c_i \cdot E \cdot \Delta_i}{r}, \text{ [МПа]}, \quad (2.47)$$

де  $\Delta_i$  – товщина стінки ємності на відповідному рівні,  $c_i$  – коефіцієнт стійкості оболонок, який обчислюється інтерполяцією за [4, табл. 14.1] в залежності від співвідношення  $\Delta_i / r$ .

Величина осьової критичної сили для різних рівнів стінки та коефіцієнт використання перерізу стінки наведена в табл. 2.7 та 2.8 відповідно. З табл. 2.7 ясно, що для всіх рівнів стінки  $\alpha > 1$ . Умова стійкості не виконана. Стійкість конструкцій ємності не забезпечена.

Таблиця 2.7 – Визначення критичних напружень

Ділянка по висоті, м	Товщина стінки, мм	Співвідношення	Коефіцієнт стійкості	Стискаючі напруження, МПа			
				Критичні		Фактичні	
				Осьова	Кільцева	Осьові	Кільцеві
	$\Delta_i$	$r/\Delta_i$	$c_i$	$\sigma_{o, cr}$	$\sigma_{k, cr}$	$\sigma_o^p$	$\sigma_k^p$
0	17	1 174	0,0765	-13,429	-2,834	-4,68	-3,900
1,49	16	1 247	0,0751	-12,407	-2,834	-4,67	-3,900
2,98	14	1 425	0,0715	-10,336	-2,834	-4,84	-3,900
11,92	13	1 535	0,0693	-9,303	-2,834	-4,10	-3,900

Таблиця 2.8 – Визначення коефіцієнтів використання стінки при втраті стійкості

Рівень	Ділянка по висоті, м	Товщина стінки, мм	Співвідношення		Коефіцієнт використання $\alpha = \frac{\sigma_o^p}{\sigma_{o, cr}} + \frac{\sigma_k^p}{\sigma_{k, cr}}$
			$\frac{\sigma_o^p}{\sigma_{o, cr}}$	$\frac{\sigma_k^p}{\sigma_{k, cr}}$	
1	0	17	0,348	1,376	1,724
2	1,49	16	0,376	1,376	1,752
3 ... 8	2,98	14	0,468	1,376	1,844
9 ... 11	11,92	13	0,441	1,376	1,817

Найбільший коефіцієнт використання спостерігається у 3-му рівні стінки товщиною 14 мм:  $\alpha_{\max} = 1,844$ .

Оцінимо величину допустимого вакууму у ємності. За умови  $\alpha_u = 1,0$ , формула (2.45) набуває вигляду  $\sigma_{ки}^p = (1 - \sigma_o^p / \sigma_{o, cr}) \cdot \sigma_{k, cr}$ . Звідси, вираз, що дозволяє оцінити граничний рівень вакууму:

$$p_{ви}^p = \left( \frac{2 \cdot \Delta_c \cdot (1 - \sigma_o^p / \sigma_{o, cr}) \cdot \sigma_{k, cr}}{D_{вн}} - W_i^p \right), \text{ [кПа]}. \quad (2.48)$$

Граничний розрахунковий вакуум:

$$p_{\text{ви}}^p = - \left( \frac{2 \cdot 14,08 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 0,468) \cdot 2,834 \cdot 10^6}{39,9} - 0,708 \cdot 10^3 \right) = -0,356 \text{ (кПа)}.$$

Граничний нормативний вакуум:

$$p_{\text{ви}} = p_{\text{ви}}^p / \gamma_{\text{fm2}} \cdot \gamma_n^I = -0,356 / (1,2 \cdot 1,25) = -0,237 \text{ (кПа)} = -23,7 \text{ (мм вод.ст)}.$$

## 2.3 Уточнене скінчено-елементе моделювання резервуарів

### 2.3.1. Опис розробленої моделі

Для отримання більш точних результатів щодо напружено-деформованого стану ємності моделювання металоконструкцій резервуару методом скінчених елементів засобами ПК «Ліра САПР». Металеві елементи ємності змодельовані пластинчастими скінченими елементами. Висота пластинчастих елементів обичайки – змінна. Для рівнів стінки товщиною 17, 16 та 14 мм прийнята висота скінчених елементів 0,497 м, для рівнів стінки товщиною 13 мм, прийнята висота скінчених елементів 0,663 м.

Конструкції металокаркасу сферичного даху були змодельовані за допомогою стрижневих скінчених елементів. При моделюванні умовно вважалось, що стінки конструкцій в рівні фундаментів жорстко приєднані до основи. Конструкції майданчиків були враховані у розрахунку корисним навантаженням, зібраним у вузлах на рівні верхнього опорного кільця. Тривимірну візуалізацію скінчено-елементної моделі ємності можна побачити на рис. 2.9 та 2.10. Кліматичні навантаження та впливи на конструкції були визначені згідно з нормативним документом [3].

З огляду на результати аналітичного моделювання, де встановлено, що проектний гідростатичний тиск та вакуум не можуть бути перенесені ємністю, розглядати випадки завантаження резервуару варіантами 1 та 2 не має сенсу [8]. Тому, враховуючи експлуатаційні обмеження, виконаємо оцінку міцності та

стійкості стінок резервуару за варіантами 3 (експлуатаційний тиск рідини) та 4 (експлуатаційний вакуум при випуску рідини).

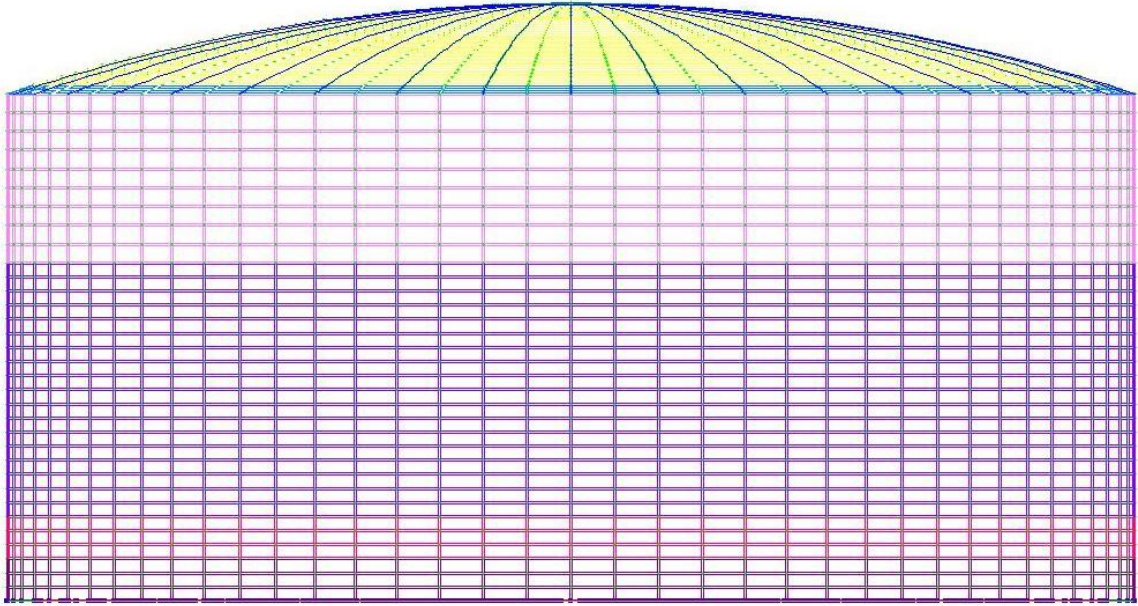
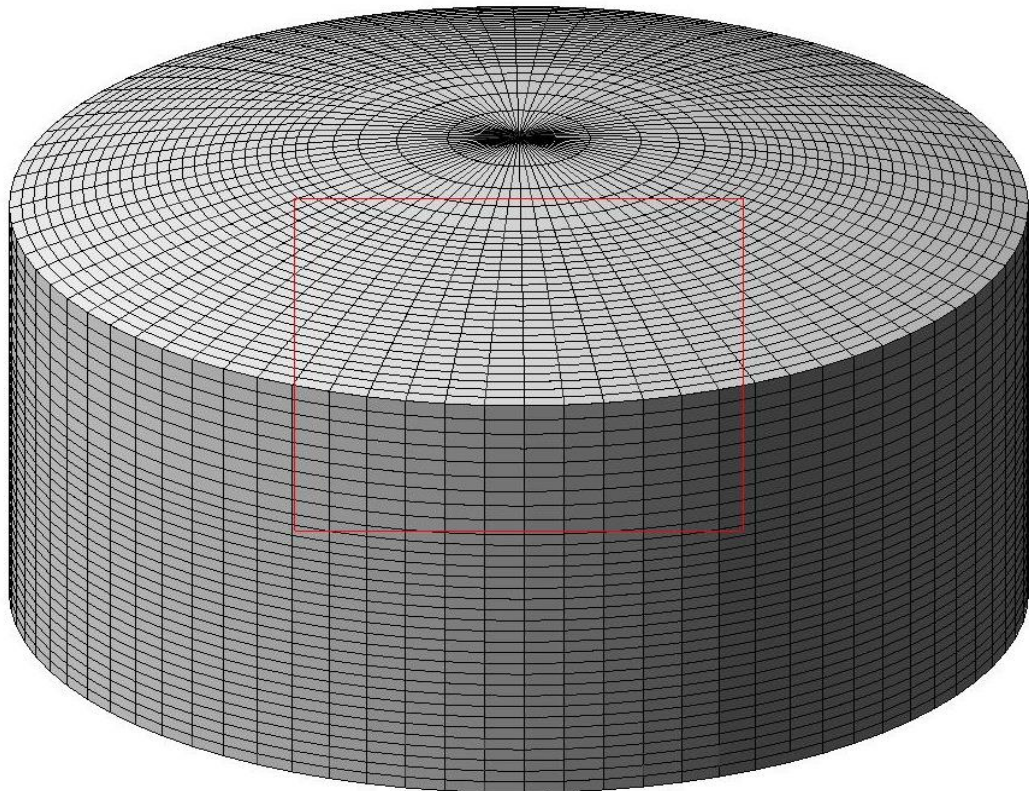


Рисунок 2.9 – Скінчено-елемента модель ємності



а)

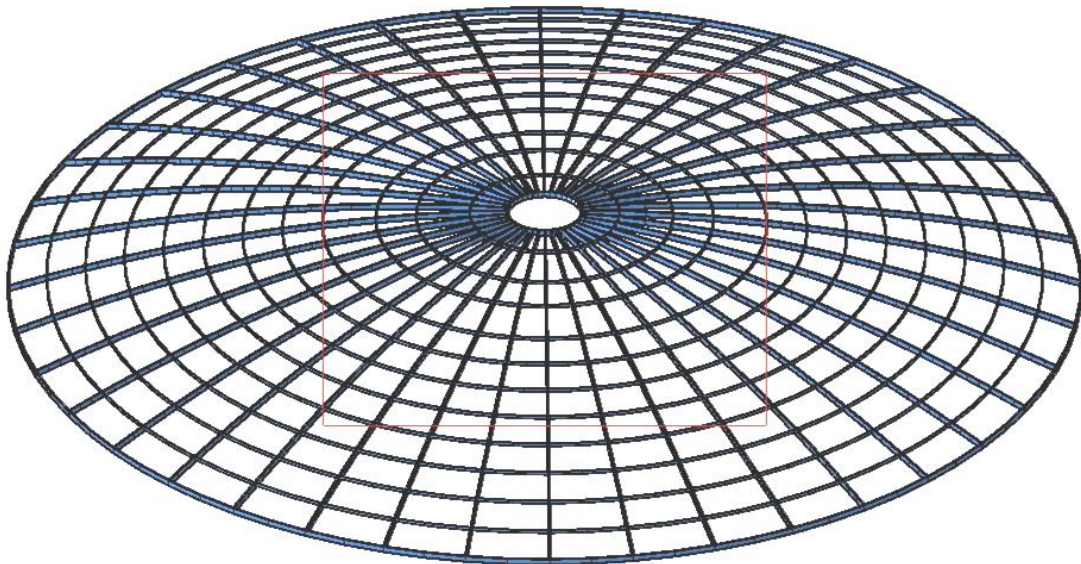


Рисунок 2.10. – Тривимірне відображення моделі: а – ємності в цілому, б – опорного металокаркасу сферичного даху разом з опорним кільцем

### 2.3.2 Модель конструкції під дією гідростатичних впливів

Модель конструкції під дією кліматичних впливів та гідростатичного впливу метанолу граничною висотою  $h_{pu} = 11 \text{ м}$  з надлишковим тиском 400 мм вод. ст. показана на рис. 2.7. Рідина моделювалася тиском (навантаженням, що зростає від верхнього рівня рідини до низу за законом Архімеда.

#### А) Аналіз міцності.

В результаті аналізу напружено-деформованого стану основних елементів ємності під дією кліматичних впливів та гідростатичного тиску від метанолу з надлишковим тиском 400 мм вод. ст. (варіант завантаження 3) виявлено, що найбільші напруження виникають в 1, 2 та 3 – му рівнях стінки, а також у 11-му рівні стінки поблизу опорного кільця.

Еквівалентні напруження у стінках ємності за енергетичною теорією Губера-Хенки-Мізесса (рис. 2.8) не перевищують гранично допустимих значень.

$$1\text{-й рівень: } \sigma_{екв, \max} = 133 \text{ МПа} < [\sigma] = 199,5 \text{ МПа} ;$$

$$2\text{-й рівень: } \sigma_{екв, \max} = 130 \text{ МПа} < [\sigma] = 228 \text{ МПа} ;$$



3-й рівень:  $\sigma_{екв, \max} = 112 \text{ МПа} < [\sigma] = 228 \text{ МПа}$  ;

11-й рівень:  $\sigma_{екв, \max} = 89 \text{ МПа} < [\sigma] = 192 \text{ МПа}$  .

Умову міцності виконано. Міцність металоконструкцій всіх рівнів обичайки забезпечена.

Б) Аналіз жорсткості.

Для оцінки жорсткості конструкції від експлуатаційних впливів було проаналізовано деформації споруди в напрямку осей  $Ox$  та  $Oy$  та прогини металоконструкцій даху (деформації по осі  $Oz$ ). Результати розрахунку деформації наведені на рис. 2.11 - 2.14.

У нормативних документах [4] та [21] деформації обичайки під навантаженням не нормуються, тому допустимі прогини і переміщення оцінені по нормах [6].

Розрахункові деформації конструкції обичайки по горизонталі  $f_x \approx f_y \approx 17 \text{ мм}$ , що не перевищує гранично встановлених меж для стінок ємності як защемлених у фундаментах конструкцій  $s_u = H / 500 = 17890 / 500 = 35,78 \text{ (мм)}$ :

$$(f_x \approx f_y \approx 17 \text{ мм}) < (s_u = 35,78 \text{ мм}).$$

Відносні прогини конструкцій даху (від опорного кільця і до стріли сфери) складають  $f_z \approx 41 \text{ мм}$ , що не перевищує гранично встановлених меж для ємності  $s_u = D / 300 = 39990 / 300 = 133 \text{ (мм)}$  (як для великопролітних балок):

$$(f_z \approx 41 \text{ мм}) < (s_u = 133 \text{ мм}).$$

Жорсткість металоконструкцій ємності в цілому, у випадку гідростатичних впливів від метанолу висотою  $h_{pu} = 11 \text{ мм}$  з надлишковим тиском азоту 400 мм вод. ст. з урахуванням кліматичних впливів забезпечена.

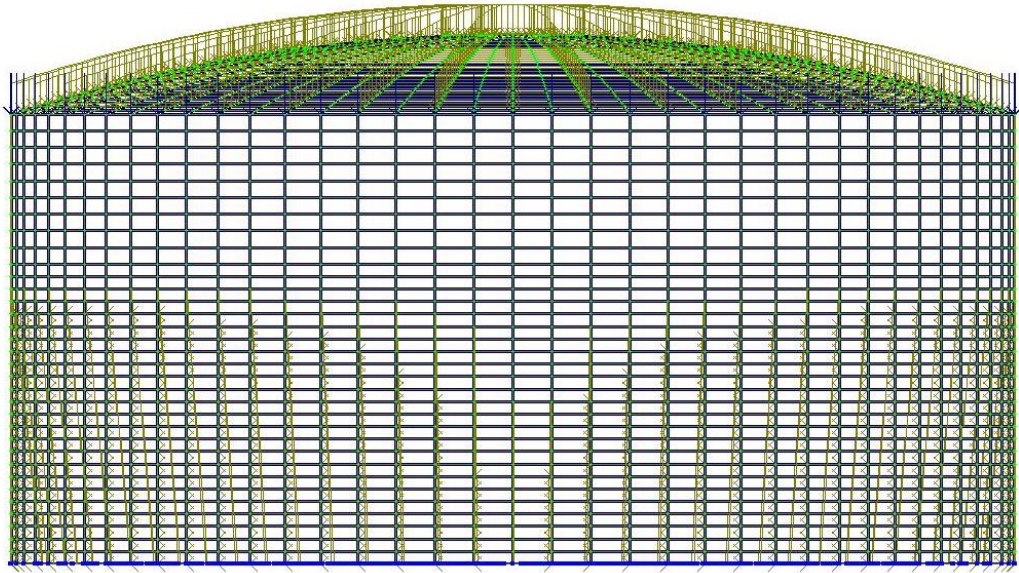


Рисунок 2.11 – Модель під впливом гідростатичного тиску від метанолу

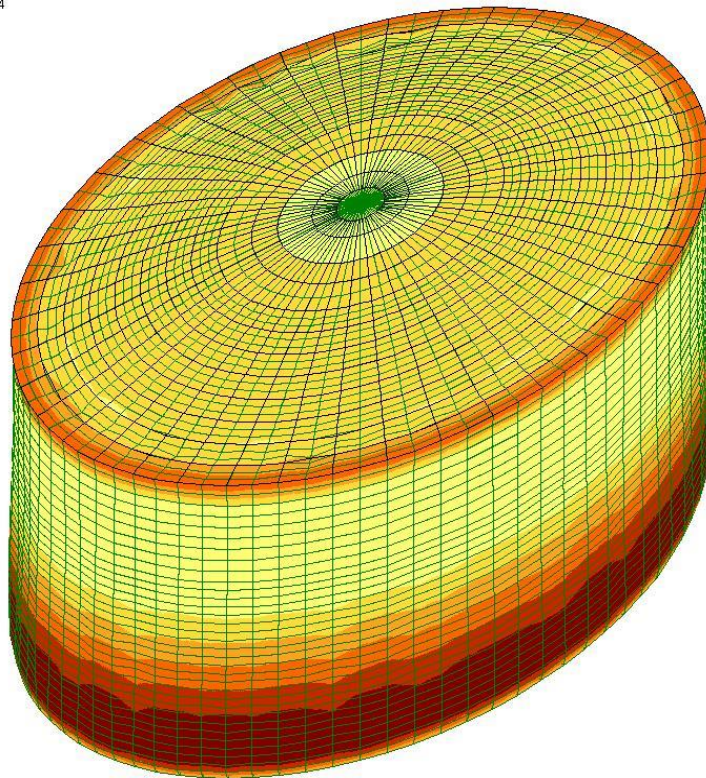
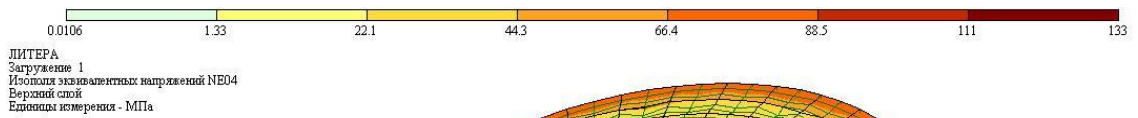
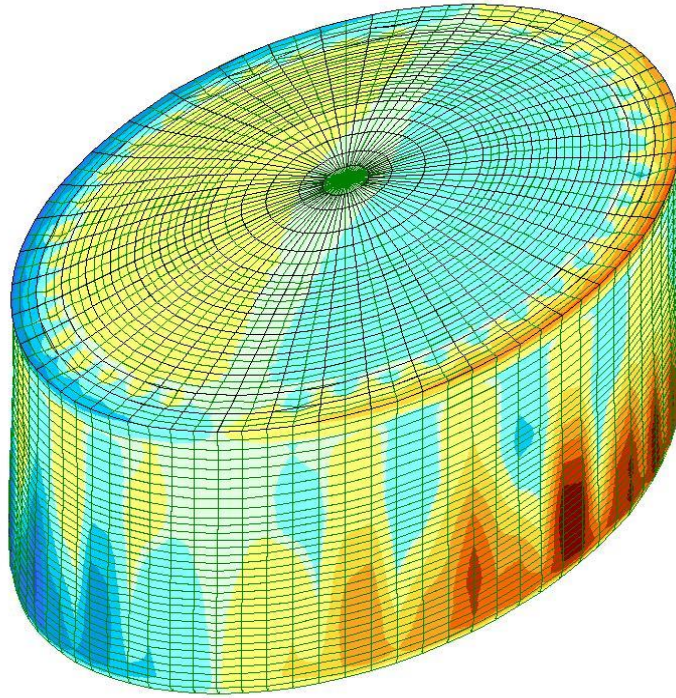


Рисунок 2.12 – Еквівалентні напруження у елементах ємності від гідростатичного тиску метанолу

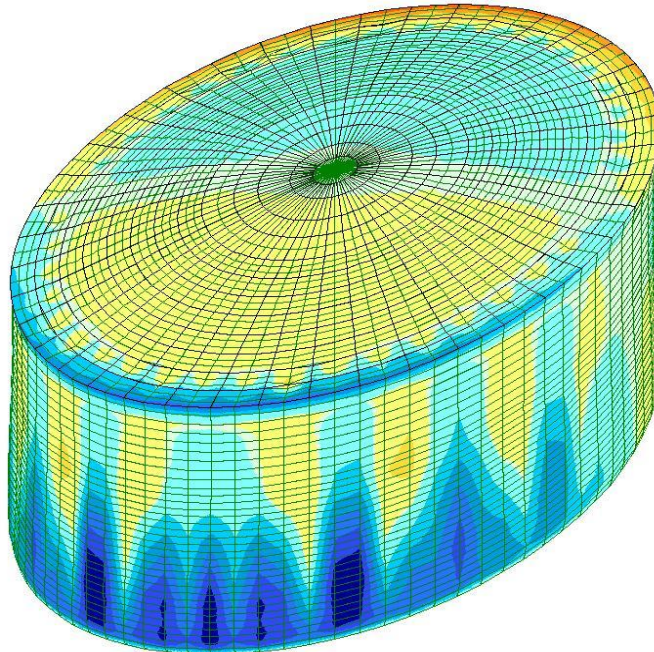


-16.5 -13.7 -11 -8.22 -5.48 -2.74 -0.164 0.164 2.74 5.48 8.22 11 13.7 16.4  
 Загруженіе 1  
 Ізополю перемещеній по X(G)  
 Единица измерения - мм



а)

-16.4 -13.6 -10.9 -8.19 -5.46 -2.73 -0.164 0.164 2.73 5.46 8.19 10.9 13.6 16.4  
 Загруженіе 1  
 Ізополю перемещеній по Y(G)  
 Единица измерения - мм



б)

Рисунок 2.13 – Деформації металоконструкцій ємності від гідростатичного тиску метанолу в напрямку осей: а –  $Ox$ , б –  $Oy$



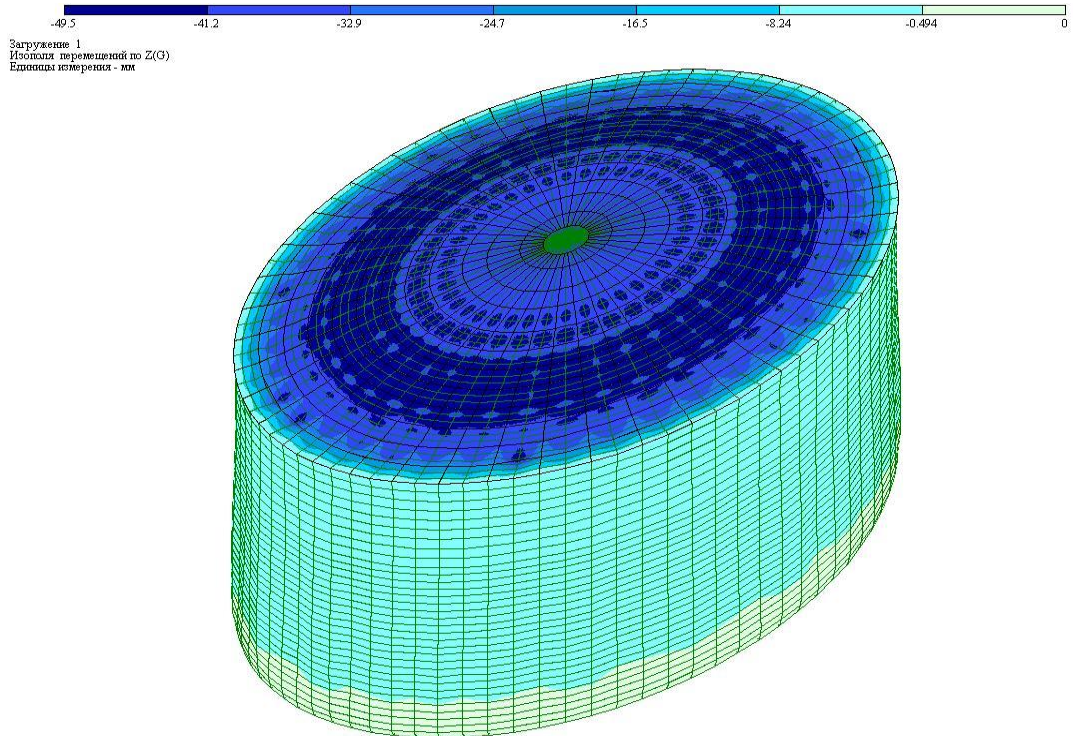


Рисунок 2.14 – Деформації металоконструкцій ємності від гідростатичного тиску метанолу в напрямку  $Oz$  (по вертикалі)

### 2.3.3. Модель конструкції під впливом вакууму

При прикладанні навантажень до металоконструкцій з вакууму, тонколистова зашивка даху втрачає стійкість через недостатній коефіцієнт запасу стійкості - 0,34. Багато деформацій (прогинів) листової зашивки даху підтверджують це. Для оцінки стійкості конструкцій стінки ємності від вакууму від відтоку вітру, була створена нова скінчено-елементна модель (рис. 2.15).

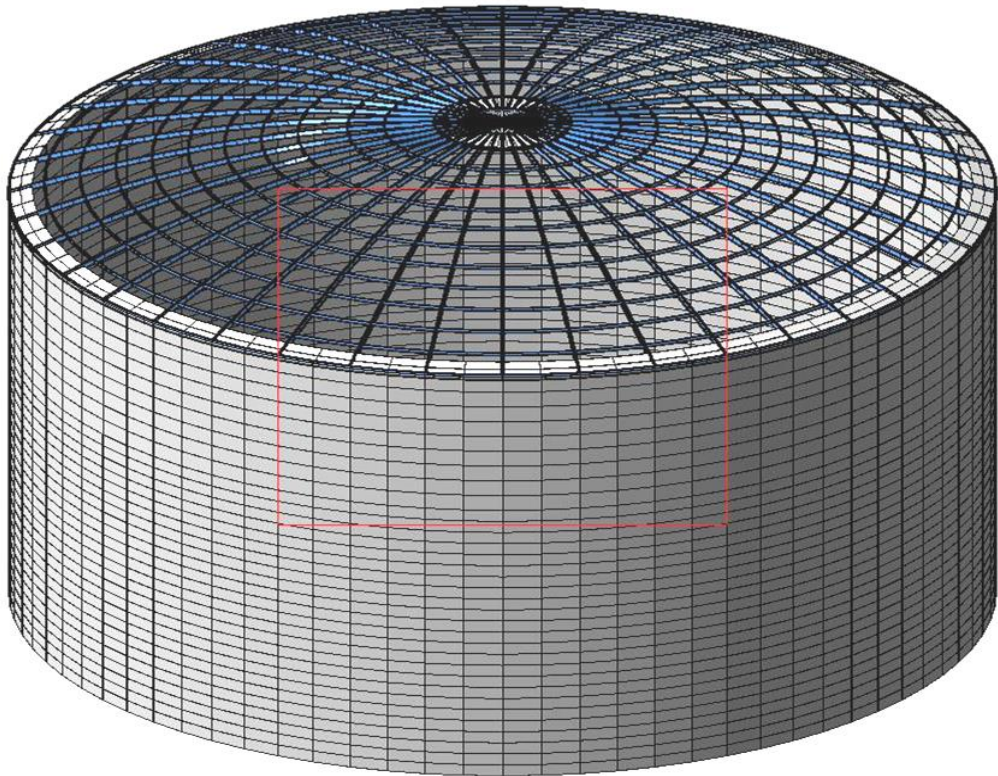


Рисунок 2.15 – Модель конструкції ємності при розрахунку стійкості від вакууму

В результаті чисельного аналізу на програмному комплексі «Ліра САПР» отримана перша форма втрати стійкості, що зображена на рис. 2.15.

Коефіцієнт запасу стійкості рівний  $n_1 = 3,05$ , що більше нормативного коефіцієнта запасу  $n_u = 2,4$ :

$$n_1 = 3,05 > n_u = 2,4.$$

Умову стійкості бічних стінок виконано.

Напруження, що виникають в будівельних конструкціях ємності при вакуумі, показані на рис. 2.16 – 2.18.

$$11\text{-й рівень: } \sigma_{екв, \max} = 12 \text{ МПа} < [\sigma] = 192 \text{ МПа}.$$

Умову міцності виконано. Міцність металоконструкцій всіх рівнів обичайки забезпечена.



Завантаження 1  
 Форма втрати стійкості в тл. с. 1  
 Коефіцієнт 3.04728

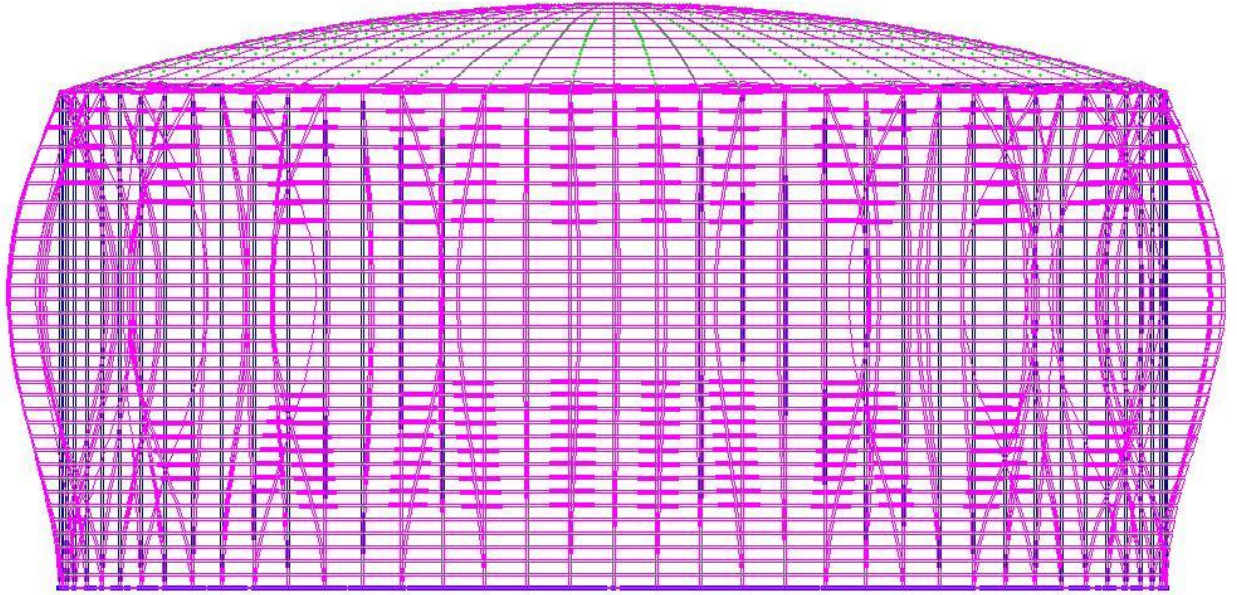
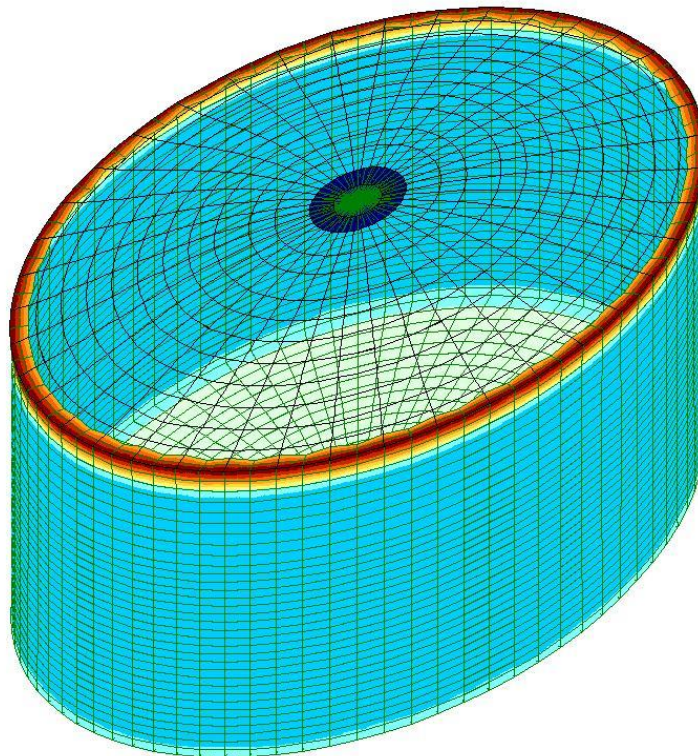
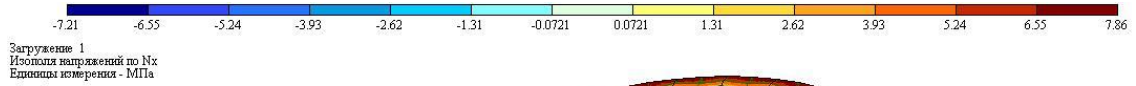
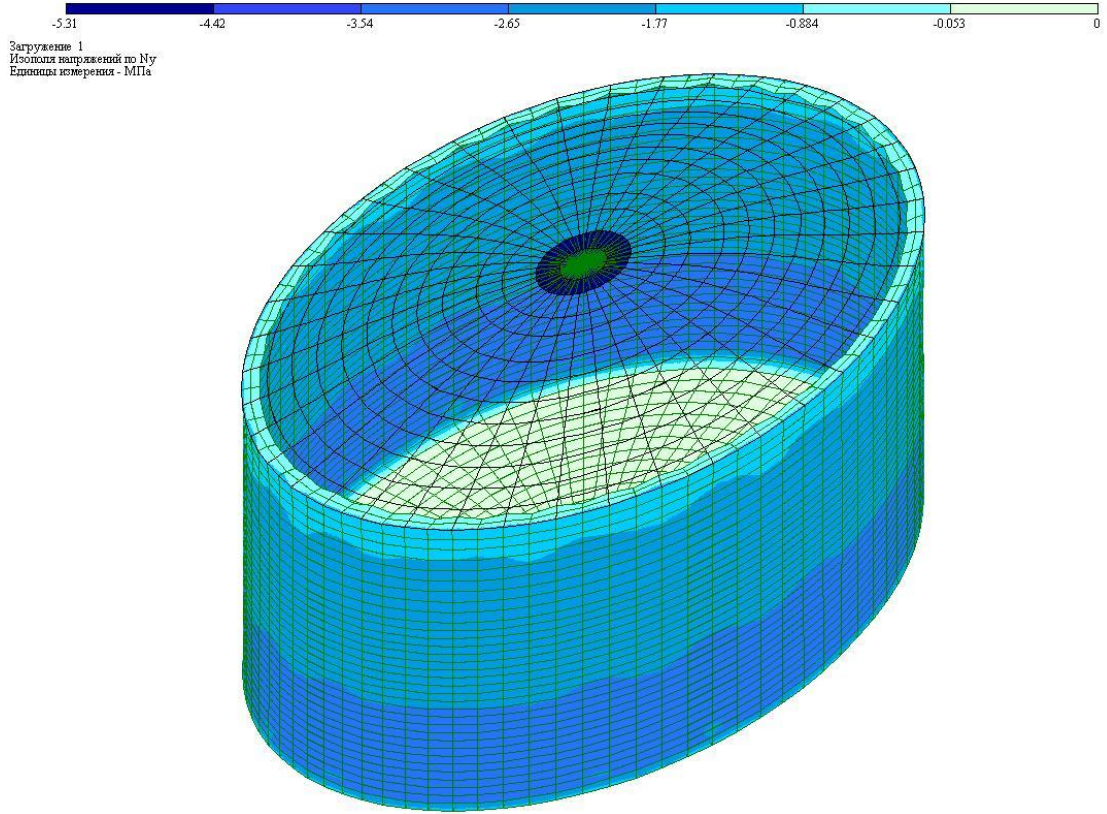


Рисунок 2.16 – Перша форма втрати стійкості форми бічних стінок ємності



a)





б)

Рисунок 2.17 – Сжимаючі напруження від вакууму: а –  $N_x$ , б –  $N_y$ , МПа

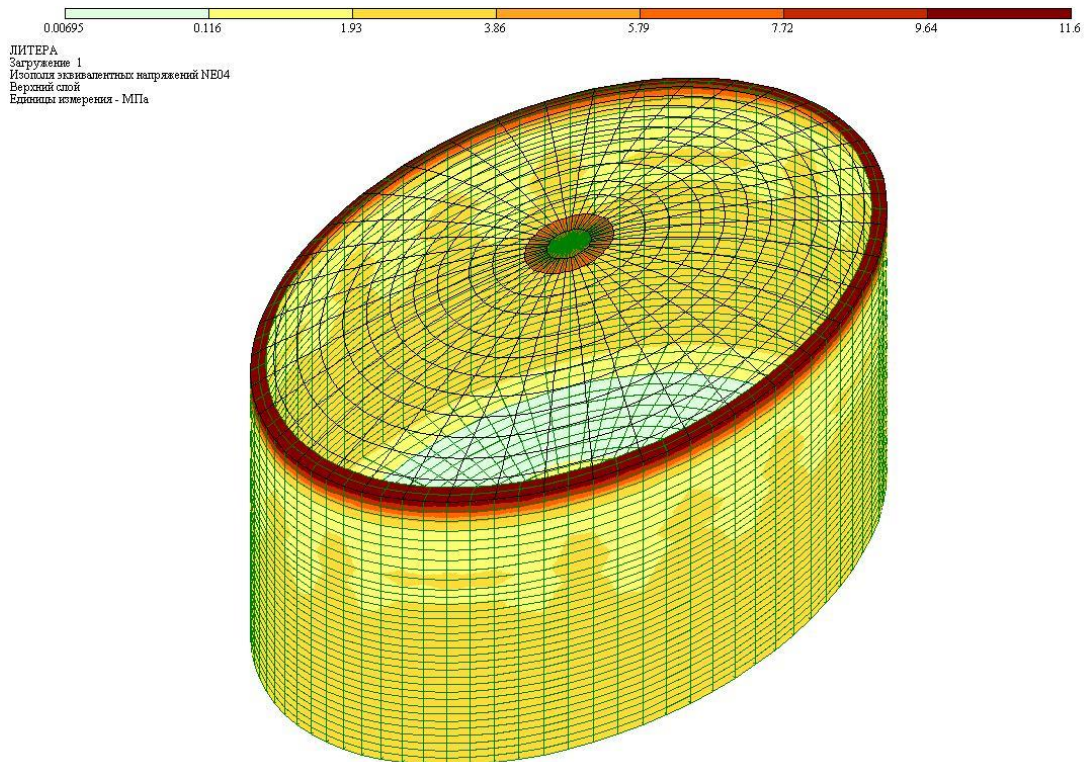


Рисунок 2.18 – Еквівалентні напруження від вакууму за енергетичною теорією міцності в стінках обичайки та опорному кільці, МПа

## 2.4 Висновки за результатами моделювання резервуарів

В цьому розділі було виконано важливе наукове завдання магістерської кваліфікаційної роботи з розроблення аналітичної та скінчено-елементної моделей напружено-деформованого стану конструкцій великорозмірного резервуару на прикладі реальної споруди, запроектованої за [8] та побудованої в кінці минулого століття на одному з хімічних підприємств у м. Южне Одеської області для зберігання метанолу.

Розроблені моделі враховують корозійний знос конструкцій, який був взятий з літературного джерела [1].

Було виявлено, що конструкція, збудована у м. Южне, за умови прикладання проектних навантажень, не відповідає сучасним вимогам до стійкості і надійності будівельних конструкцій резервуарів. Конструкція перевантажена як при гідростатичних випробуваннях (заповнення ємності на 100% морською водою), так і при проектному вакуумі (500 мм вод. ст.), причому вакуум, що діє на порожню ємність, може призвести до катастрофічних наслідків.

В ході моделювання виявлено, що для будівельних конструкцій ємності найбільш небезпечним є вплив вакууму з урахуванням впливу вітру.

Враховуючи сучасні підходи щодо роботи циліндричних резервуарів під навантаженням виявлено експлуатаційні обмеження (обмеження рівня вакууму (23 мм вод. ст.) та обмеження висоти заповнення резервуару (11 м) корисним продуктом).

Було виявлено, що у вітчизняних нормах відсутня надійна методика, щодо моделювання сейсмічних впливів на резервуари, тому запропоновано використовувати методику рекомендовану у [5, 7]: СТО-СА-03.003-2009. «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на сейсмические воздействия» [12].

## РОЗДІЛ 3 КОНСТРУКТИВНІ ПРОПОЗИЦІЇ ПО ПІДСИЛЕННЮ ІСНУЮЧИХ РЕЗЕРВУАРІВ

### 3.1 Типові дефекти і пошкодження резервуарів

Типові дефекти і пошкодження резервуарів можуть впливати на їхню ефективність, безпеку та довговічність. Розглянемо деякі з них:

**Корозія:** Це процес природного руйнування металів під впливом атмосфери, води, хімічних реакцій тощо. Корозія може пошкодити стінки, днище та інші елементи резервуара, що може призвести до протікання, зменшення міцності конструкції або інших проблем [22].

**Механічні пошкодження:** Відбуваються в результаті ударів, вібрації, або неправильної експлуатації. Такі пошкодження можуть включати тріщини, вм'ятини, забоїні з'єднання, що може спричинити витік рідини, зниження міцності конструкції чи інші небезпеки

**Відклеювання покриття:** Покриття на поверхні резервуара можуть почати відходити, що призводить до корозії та інших проблем, які впливають на їхню довговічність та функціональність [24].

**Втрата герметичності:** Резервуари можуть втратити герметичність через пошкодження ущільнювачів, швів чи інших елементів, що спричиняє витік рідини, газу або інших матеріалів [25].

**Старіння матеріалів:** З часом матеріали, з яких виготовлені резервуари, можуть втрачати свої властивості, ставати крихкими та піддаючись корозії та іншим впливам. Це може призвести до виникнення дефектів і зниження ефективності резервуара [23].

**Випадкові пошкодження:** Пошкодження, спричинені природними явищами, такими як бурі, землетруси, або людською діяльністю, такою як аварії під час транспортування чи встановлення резервуара. Випадкові пошкодження можуть призвести до серйозних наслідків, таких як протікання, втрата герметичності та інші проблеми.

Тріщини від термічного напруження: Різкі зміни температури можуть викликати термічне напруження у матеріалі резервуара, що може призвести до появи тріщин та інших дефектів [26].

Відмова арматури: Несправність клапанів, насосів або інших компонентів арматури може призвести до витоків, перевантаження, забруднення та інших проблем [23].

Деформація структури: Неправильне встановлення, підтримка чи навантаження можуть призвести до деформації стінок, дна чи опорних структур резервуара, що в свою чергу може призвести до зниження міцності конструкції та інших проблем [23].

Біологічне забруднення: Накопичення мікроорганізмів, таких як бактерії та водорості, можуть призвести до забруднення вмісту резервуара, корозії та інших проблем.

Регулярний моніторинг, обслуговування та ремонт резервуарів можуть допомогти запобігти цим дефектам та забезпечити безпечну та ефективну роботу резервуарів на протязі їх експлуатаційного терміну [24,26].

### 3.1.1 Урахування викривлення геометрії

Урахування викривлення геометрії важливе в ряді різних галузей, включаючи інженерію, архітектуру, конструкційне проектування та транспорт. Викривлення геометрії може виникати з різних причин, таких як неправильне виготовлення, деформація під час експлуатації або навантаження, або ефекти природних явищ, таких як зміни температури або сейсмічні активності. Це може призвести до зниження міцності, стійкості та ефективності конструкцій [27].

Ось деякі пункти, які слід враховувати при урахуванні викривлення геометрії:

Відхилення від номінальної геометрії: Оцінка рівня відхилення конструкції від її номінальної геометрії може допомогти ідентифікувати та вирішити проблеми, пов'язані з викривленням геометрії. Відхилення можуть включати

вигин, розширення, стискання, кручення, або відхилення від проєктованих розмірів чи відстаней.

Методи контролю якості: Застосування стандартів контролю якості та процедур інспектування на етапі виробництва, монтажу та експлуатації може допомогти виявити викривлення геометрії та вжити необхідних заходів для їх усунення або компенсації.

Матеріали та їх властивості: Розуміння матеріалів, які використовуються у конструкції, та їх властивостей, таких як пружність, міцність на стиск та на розтяг, може допомогти уникнути викривлення геометрії або розробити заходи щодо його усунення та контролю.

Компенсаційні заходи: У деяких випадках викривлення геометрії може бути компенсовано за допомогою розрахунків, конструктивних змін або застосування додаткових елементів підтримки. Це може включати зміну форми або розмірів конструкційних елементів, використання попередньо вигнутих елементів або застосування регульовальних пристроїв, таких як пружини або гідравлічні демпфери [28].

Моніторинг та діагностика: Регулярне проведення оглядів, діагностики та моніторингу стану конструкцій може допомогти виявити викривлення геометрії та вжити необхідних заходів для його усунення або запобігання. Це може включати використання різних методів неруйнівного контролю, таких як ультразвуковий контроль, рентгенографія, тепловізійної техніки тощо.

Проектування на безпеку: При проектуванні конструкцій важливо враховувати можливі викривлення геометрії та передбачати заходи щодо його усунення або запобігання. Це може включати вибір відповідних матеріалів, геометрії, розрахунок безпекових факторів та врахування впливу зовнішніх факторів, таких як температура, вологість або навантаження від вітру [29].

Загалом, урахування викривлення геометрії має важливе значення для забезпечення безпеки, надійності та довговічності конструкцій. Врахування цього фактору в проектуванні, виробництві та експлуатації буде забезпечувати оптимальні результати та ефективне використання ресурсів [30, 31].



### 3.1.2 Способи захисту від корозії

Корозія сталевих резервуарів може призвести до значних матеріальних витрат і негативних наслідків для довкілля. Для запобігання корозії розглянемо декілька основних способів захисту:

**Застосування захисних покриттів:** Нанесення на поверхню сталевих резервуарів антикорозійних фарб чи покриттів забезпечує додатковий захист від корозії. Вибір матеріалу покриття залежить від середовища і хімічних речовин, з якими контактує резервуар [30, 31].

**Катодний захист:** Встановлення катодного захисту полягає в тому, щоб зробити сталевий резервуар менш активним електродом. Це можна досягти за допомогою жертвенного анода або зовнішнього джерела струму.

**Використання корозійностійких сталей:** Використання нержавіючих сталей або інших корозійностійких сплавів допомагає зменшити ризик корозії.

**Захист від вологи:** Обмеження впливу вологи, контроль рівня вологості і використання гідрофобізуючих матеріалів можуть допомогти запобігти корозії.

**Регулярний моніторинг і технічне обслуговування:** Проведення регулярних оглядів і тестувань корозійної активності, а також своєчасне виявлення і усунення пошкоджень допомагає запобігти корозії.

**Інгібітори корозії:** Введення хімічних інгібіторів, які знижують корозійну активність середовища, можуть захистити сталеві резервуари від корозії.

Застосування одного або кількох з цих способів може допомогти запобігти корозії та продовжити службу сталевих резервуарів на довгі роки [31, 32].

### 3.2 Пропонована технологія ремонтних робіт

Найкраща технологія ремонтних робіт сталевих резервуарів залежить від обсягу та характеру пошкоджень та вимог до експлуатації. Існує декілька технік ремонту, які використовуються для відновлення функціональності та міцності резервуарів:

**Зварювання:** Зварювання є одним з найпоширеніших методів ремонту сталевих резервуарів. Воно передбачає з'єднання металевих частин розплавленим

металом. Цей метод може бути використаний для відновлення тріщин, заміни пошкоджених сегментів та відновлення з'єднань [32].

Нанесення захисних покриттів: Застосування захисних покриттів, таких як фарби, лаки або епоксидні покриття, може допомогти відновити корозійний захист резервуарів після ремонтних робіт.

Використання композитних матеріалів: Для відновлення пошкоджених областей можна застосувати композитні матеріали, такі як скловолокно або вуглецеві волокна, змішані з полімерною матрицею. Ці матеріали мають високу міцність та стійкість до корозії, що забезпечує довговічність ремонту.

Болтові з'єднання та механічні затискачі: У деяких випадках можна використати болтові з'єднання та механічні затискачі для відновлення функціональності резервуарів. Ці методи зазвичай використовуються для тимчасових ремонтів або коли зварювання неможливе через робочі умови [33].

Гідроформування може використовуватися для відновлення форми та геометрії резервуарів, які зазнали деформації внаслідок корозії чи інших факторів. Цей процес включає впровадження гідравлічного тиску всередині резервуару, який повертає структуру до первісного стану.

Вакуум-підтяжка – це метод відновлення форми резервуарів шляхом створення вакууму всередині резервуару та одночасного нагрівання зовнішньої поверхні. Це може бути корисним для відновлення резервуарів з малими деформаціями та стискаючи тріщини перед зварюванням.

Заміна сегментів: У випадках серйозних пошкоджень чи руйнувань, можливо, доведеться замінити частину або весь сегмент резервуара новими сталевими панелями. Це може забезпечити тривалу стійкість резервуару до корозії та інших впливів [33, 34].

Регулярне обслуговування та контроль якості: Важливо проводити регулярні інспекції та обслуговування резервуарів, щоб виявити корозійні пошкодження та провести ремонтні роботи перед тим, як вони призведуть до серйозних проблем. Контроль якості ремонтних робіт, включаючи зварювання та нанесення покриттів, також є важливим для забезпечення довговічності ремонтів.

Вибір найкращої технології ремонтних робіт сталевих резервуарів залежить від специфіки робочих умов, типу та розміру пошкоджень, а також від ресурсів та обладнання, доступних для ремонту. У більшості випадків комбінація декількох методів та технік дасть найкращий результат, що забезпечить тривалу стійкість резервуарів до корозії та інших впливів [33, 34].

### 3.3 Висновки з конструктивних та технологічних пропозицій капітального ремонту резервуарів

Підводячи підсумки конструктивних та технологічних пропозицій щодо капітального ремонту резервуарів, можна визначити наступні висновки:

**Правильний вибір методів ремонту:** Важливо обрати оптимальний метод ремонту, залежно від типу, розміру та рівня пошкоджень резервуарів, а також від ресурсів, обладнання та робочих умов.

**Використання новітніх технологій:** Застосування сучасних технологій та матеріалів у процесі ремонту може підвищити ефективність ремонту та забезпечити тривалу стійкість резервуарів до корозії та інших впливів.

**Забезпечення якості ремонтних робіт:** Контроль якості ремонтних робіт, зокрема зварювання, нанесення покриттів та монтаж конструктивних елементів, є важливим для забезпечення довговічності ремонту.

**Регулярне обслуговування та інспекція:** Проведення регулярних інспекцій та обслуговування резервуарів допомагає виявити корозійні пошкодження на ранніх стадіях та запобігти серйозним проблемам в майбутньому.

**Враховання екологічних аспектів:** У процесі капітального ремонту резервуарів необхідно враховувати екологічні вимоги, такі як захист ґрунту, води та повітря, для забезпечення сталого розвитку та мінімізації впливу на навколишнє середовище.

**Розробка плану ремонту та плану дій:** Ретельне планування капітального ремонту резервуарів, включаючи розробку графіків робіт, оцінку вартості та

координацію ресурсів, допомагає забезпечити своєчасне та ефективне виконання ремонтних робіт.

Підвищення кваліфікації персоналу: Навчання та підвищення кваліфікації персоналу, що здійснює ремонтні роботи, є важливим для забезпечення високої якості робіт та запобігання подальшим проблемам, пов'язаним з корозією та іншими пошкодженнями.

Безпека під час ремонту: Забезпечення безпечних робочих умов під час капітального ремонту резервуарів є важливим аспектом. Необхідно враховувати потенційні ризики, такі як робота на висоті, робота з відкритим вогнем, використання важкого обладнання та робота в обмежених просторах.

Повторне введення в експлуатацію: Після завершення ремонтних робіт ретельно перевіряйте всі системи резервуара, включаючи наявність щільності, стабільність конструкцій та належне функціонування інструментів, перш ніж повторно ввести резервуар в експлуатацію.

Крім того, можна скласти комплексний план капітального ремонту резервуарів, який буде спрямований на відновлення їхньої надійності, забезпечення сталого функціонування та запобігання подальшим проблемам з корозією та іншими пошкодженнями.

До інших важливих аспектів капітального ремонту відноситься ефективне управління процесом ремонту, забезпечення вчасності виконання робіт та контроль витрат. Оптимізація планування робіт та раціональне використання ресурсів можуть сприяти скороченню часу ремонту та зниженню витрат.

Додатково, необхідно враховувати фінансові та економічні аспекти при розробці стратегії капітального ремонту. Оцінка ефективності ремонту, розрахунок витрат та планування бюджету дозволяють забезпечити економічну доцільність проекту та оптимальне використання ресурсів.

Враховуючи всі ці аспекти, капітальний ремонт резервуарів може бути успішно реалізований, забезпечуючи підвищення надійності, тривалості експлуатації.

## РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Розрахунок кошторисної вартості ремонту існуючого резервуару на конкретному прикладі

З метою розрахунку кошторисної вартості сталевго резервуару було взяті наступні вихідні дані:

-ступінь пошкодження	середній
- внутрішній діаметр обичайки	39,9 м
- висота циліндричної частини	17,89 м
- радіус сферичного даху	60,0 м
- висота сегмента сферичного даху	3,4 м
- загальна висота споруди від рівня цоколя	21,52 м
Корисний об'єм	20 000 м <sup>3</sup>

Для проведення ремонтних робіт на сталевому циліндричному резервуарі, необхідно визначити, які саме роботи потрібно виконати. Можна виділити такі етапи ремонту:

1. Очищення резервуара від старого антикорозійного покриття, обробка поверхні і видалення іржі.
2. Виявлення і ремонт дефектів металу.
3. Відновлення антикорозійного захисту резервуара.
4. Покриття фарбою.

Для проведення робіт з очищення, виявлення і ремонту дефектів, відновлення антикорозійного захисту та покриття фарбою знадобляться спеціальні інструменти та матеріали. Нижче наведений кошторис на ремонт резервуара площею 20 000 м<sup>3</sup> з середнім ступенем пошкодження:

Капітальний ремонт великорозмірного сталевого циліндричного резервуару для зберігання неагресивних рідин  
09/05/2023

**Локальний кошторис на будівельні роботи №02-01-01**

на Ремонтні роботи

**РЕЗЕРВУАР**

Основа:  
креслення (специфікації) №

Кошторисна вартість 2607,988 тис. грн.  
Кошторисна трудомісткість 15,23551 тис.люд.год.  
Кошторисна заробітна плата 1217,913 тис. грн.  
Середній розряд робіт 4,1 розряд

Складений за поточними цінами станом на "9 травня" 2023 р.

№ Ч.ч.	Обґрунтування (шифр норми)	Найменування робіт і витрат	Одиниця виміру	Кількість	Вартість одиниці, грн.		Загальна вартість, грн.			Витрати труда робітників, люд.год.	
					Всього	експлуатації машин	Всього	заробітної плати	експлуатації машин	не зайнятих обслуговуванням машин	
										в тому числі заробітної плати	в тому числі заробітної плати
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	КР8-9-1	Заміна покрівель резервуарів окремими місцями 1 шару рулонного покриття	100м2	5	7418,84 2441,33	19,66 17,34	37094	12207	98 87	35,3100 0,2448	176,55 1,22
2	КР20-38-1	Очищення металевих конструкцій від корозії металевими щітками	м2	4761	21,38 17,18	-	101790	81794	-	0,2800	1333,08
3	ПР13-6024	Механізоване покриття металевих поверхонь ґрунтом ХС-059	100 м2	47,61	3239,32 467,37	580,62 151,29	154224	22251	27643 7203	5,5200 2,0316	262,81 96,72
4	ПР13-6007	Нанесення захисного шару із силікатної шпаклівки на поверхні вертикальні товщиною 10 мм	м2	4761	268,13 113,29	45,54 14,38	1276567	539374	216816 68463	1,3700 0,1929	6522,57 918,3
5	КР12-31-2	Фарбування олійними сумішами за 2 рази раніше пофарбованих металевих поверхонь	100м2	47,61	4472,39 1794,38	-	212930	85430	-	25,3300	1205,96
6	ПХ2-5004	Ремонт резервуара V-20 000 м3; R-60 м; H-17,89 м.	резерв.	1	37220,50 15923,45	344,48 86,56	37221	15923	344 87	209,8200 1,1443	209,82 1,14
7	КР12-55-1	Фарбування великих металевих поверхонь суриком за 1 раз	100м2	2	2396,99 1140,11	1,04 0,87	4794	2280	2 2	15,8900 0,0111	31,78 0,02
8	КР18-70-2	Середній ремонт металевих огорож	м2	300	714,52 672,60	31,18 1,19	214356	201780	9354 357	9,6100 0,0156	2883 4,68
9	КР20-12-4	Нарощування додаткових поясів до стінок резервуарів	1т	1	5221,69 4072,50	1149,19 251,28	5222	4073	1149 251	47,7600 2,5702	47,76 2,57
10	ПР9-7027-4	Дрібні металокопії різного призначення, що монтуються з застосуванням електрозварювання, маса конструкції до 0,6 т. монтаж	т	3	4349,95 2839,40	1198,65 293,96	13050	8518	3596 882	35,9000 3,5466	107,7 10,64
11	ЖР1-301-60	Заміна окрайків днища на резервуарі	10 стик	1	656,87 455,82	157,48 5,99	657	456	157 6	4,0600 0,0788	4,06 0,08
12	ЖР1-861-20	Заварка корозійних раковин і отворів з постановкою окремих латок	10 стик	1	2440,81 1388,26	531,20 20,20	2441	1388	531 20	14,4100 0,2658	14,41 0,27
Разом прями витрати по кошторису							2060346	975474	259690 77358		12799,5 1035,64
Разом будівельні роботи, грн.							2060346				
в тому числі:											
вартість матеріалів, виробів та комплектів, грн.							825182				
всього заробітна плата, грн.							1052832				
Загальновиробничі витрати, грн.							547642				
трудомісткість в загальновиробничих витратах, люд.год.							1400,37				
заробітна плата в загальновиробничих витратах, грн.							165081				
<b>Всього будівельні роботи, грн.</b>							<b>2607988</b>				
-----											
<b>Всього по кошторису</b>							<b>2607988</b>				
<b>Кошторисна трудомісткість, люд.год.</b>							<b>15235,51</b>				
<b>Кошторисна заробітна плата, грн.</b>							<b>1217913</b>				

Отже, загальна вартість проведення ремонтних робіт на сталевому циліндричному резервуарі площею 5 кубічних метрів з середнім ступенем пошкодження складає **2 607 988 грн** [36,37,38,39].

#### 4.2 Визначення узагальнених вартісних показників (на 1 м<sup>3</sup> корисного об'єму конструкції)

Узагальнені вартісні показники грають важливу роль у визначенні вартості будівельних робіт і є важливим елементом у створенні детального кошторису на ремонт сталевого циліндричного резервуара [40, 42].

##### 1. Вартість на 1 м<sup>3</sup> корисного об'єму конструкції:

Для розрахунку вартості на 1 м<sup>3</sup> корисного об'єму конструкції потрібно розділити загальну кошторисну вартість ремонту на об'єм резервуару:

$$\text{Вартість на 1 м}^3 = \text{Кошторисна вартість ремонту} / \text{Об'єм резервуару} \quad (4.1)$$

$$\text{Вартість на 1 м}^3 = 2\,607\,988 \text{ грн} / 20\,000 \text{ м}^3 = 130,40 \text{ грн/м}^3$$

Однак, з огляду на те, що резервуар використовується для зберігання неагресивних рідин, кошторисні витрати на ремонт можуть бути нижчі порівняно з резервуарами, які використовуються для зберігання агресивних рідин. Якщо припустити, що кошторисна вартість ремонту залежить від типу рідини, яку зберігає резервуар, то можна очікувати, що вартість на 1 м<sup>3</sup> корисного об'єму конструкції буде меншою [41, 42].

##### 2. Рентабельність:

Рентабельність можна розрахувати, відшкодувавши кошти, витрачені на ремонт, зі збуту продукту, який зберігається в резервуарі [41]:

$$\text{Рентабельність} = \frac{(\text{Прибуток} - \text{Кошторисна вартість ремонту})}{\text{Кошторисна вартість ремонту}} \quad (4.2)$$

Для цього потрібно знати вартість продукту, який зберігається в резервуарі, а також вартість інших витрат на експлуатацію резервуару.

### 3. Показник обертання активів:

Цей показник відображає ефективність використання активів компанією для генерації виручки. Для його розрахунку потрібно знати вартість продукту, який зберігається в резервуарі, та середньорічний обсяг продажів компанії [41]:

$$\text{Показник обертання активів} = \text{Обсяг продажів} / (\text{Вартість продукту на } 1 \text{ м}^3 * \text{Об'єм резервуару}) \quad (4.3)$$

### 4. Середньорічний прибуток від зберігання рідини в резервуарі:

Середньорічний прибуток можна розрахувати, враховуючи вартість рідини, що зберігається в резервуарі, та річний обсяг продажу компанії:

$$\text{Середньорічний прибуток} = (\text{Вартість продукту на } 1 \text{ м}^3 * \text{Об'єм резервуару} * \text{Річний обсяг продажу компанії}) / 2 \quad (4.4)$$

(Причина ділення на 2 полягає в тому, що резервуар наполовину заповнений в середньому за рік)

### 5. Показник доходу на інвестицію (ROI):

Показник ROI допомагає визначити ефективність вкладення коштів в резервуар з урахуванням отриманого прибутку [41]:

$$\text{ROI} = (\text{Прибуток} - \text{Кошторисна вартість ремонту}) / \text{Кошторисна вартість ремонту} \quad (4.5)$$

Де прибуток розраховується, як описано в пункті 4.

### 6. Показник амортизації:

Показник амортизації відображає, скільки витрат на ремонт резервуару можна зарахувати на його вартість:

$$\text{Показник амортизації} = \text{Кошторисна вартість ремонту} / \text{Вартість резервуару} \quad (4.6)$$

Для визначення вартості резервуару потрібно знати його вікові показники, технічний стан та вартість аналогічних резервуарів на ринку[41].



### 4.3 Розрахунок економічного ефекту

Задля проведення розрахунку економічного ефекту ремонту сталевому резервуару використовуємо деякі середні показники по Україні на 2023 рік. Нижче наведені деякі приклади таких показників:

Тривалість ремонту: середньою тривалістю ремонту промислового обладнання в Україні є 14 днів.

Очікувана тривалість експлуатації після ремонту: за даними Міністерства економіки України, середня тривалість експлуатації промислового обладнання в Україні становить 10-12 років.

Орендна плата за зберігання рідини: залежно від конкретного місця знаходження резервуару та типу зберіганої рідини, цей показник може суттєво відрізнятися. Середня орендна плата за зберігання промислових резервуарів в Україні становить близько 2000 грн/місяць на 1000 м<sup>3</sup>.

Процент амортизації: для промислового обладнання, яке використовується більше 5 років, застосовується ставка амортизації від 10% до 50% на рік, залежно від конкретних умов використання.

Вартість праці: середня годинна вартість праці в Україні в 2023 році становить близько 60-80 грн на годину, в залежності від регіону та конкретної спеціальності [39, 43, 44].

Для розрахунку економічного ефекту використаємо формулу (4.7):

$$\text{Економічний ефект} = \text{Зменшення витрат} - \text{Вартість ремонту} \quad (4.7)$$

Зменшення витрат будемо розраховувати за допомогою середніх показників по Україні на 2023 рік:

Зменшення витрат на електроенергію: заощадження складає 10-30%, середнє значення - 20%.

Зменшення витрат на електроенергію = 20% \* 20000 \* 2.5 \* 0.15 = 15,000 грн/рік.

Тут 20% - середнє значення заощадження на електроенергії, 20000 - обсяг резервуару в м<sup>3</sup>, 2.5 - середня кількість циклів насосів на добу, 0.15 - середній тариф за 1 кВт·год [45, 46, 47].

Зменшення витрат на зарплатню: заощадження складає 20-40%, середнє значення - 30%.

Зменшення витрат на зарплатню =  $30\% * 20000 * 0.5 = 3,000$  грн/рік.

Тут 30% - середнє значення заощадження на зарплаті, 20000 - обсяг резервуару в м<sup>3</sup>, 0.5 - середня кількість робочих годин на добу.

Зменшення витрат на обслуговування: заощадження складає 15-30%, середнє значення - 22,5%.

Зменшення витрат на обслуговування =  $22.5\% * 20000 * 0.8 * 0.1 = 3,600$  грн/рік.

Тут 22.5% - середнє значення заощадження на обслуговуванні, 20000 - обсяг резервуару в м<sup>3</sup>, 0.8 - коефіцієнт використання машин та обладнання, 0.1 - середній відсоток від загальної вартості обладнання на обслуговування [45, 46, 47].

Загальне зменшення витрат складає:

Зменшення витрат =  $15,000 + 3,000 + 3,600 = 21,600$  грн/рік.

Таким чином, можна розрахувати економічний ефект:

Економічний ефект =  $21,600 - 2,607,988 = -2,586,388$  грн/рік [45, 46].

Отже, отриманий результат економічного ефекту становить -2 592 868 грн. Це означає, що витрати на ремонт резервуару перевищують заощадження, отримані в результаті зменшення витрат на електроенергію, зарплатню та обслуговування. Таким чином, з економічної точки зору, ремонт даного резервуару на поточний момент не є доцільним [48, 49, 50].

## ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі в результаті комплексних досліджень поведінки резервуарів під навантаженням було виконано оптимізацію конструкції резервуарів та режимів їх експлуатації. Досягнуто наступних наукових результатів.

1. Було розроблено методику аналізу напружено-деформованого стану великорозмірних резервуарів для раціонального проектування на реальному прикладі, яка полягає у аналізі внутрішніх напружень у елементах бічної стінки резервуарів від різних варіантів навантажень та порівнянні їх екстремальних значень з допустимими величинами, визначеними згідно з чинною нормативною документацією.

2. На основі розроблених моделей напружено-деформованого стану з урахуванням дефектів і пошкоджень конструкцій запропоновано метод, який дозволяє оцінити граничну висоту і, відповідно, граничну місткість існуючих резервуарів, для довільного корисного продукту без підсилення основних несучих елементів. Це дозволяє без значних капітальних вкладень експлуатувати споруду за призначенням. Метод полягає у знаходженні максимального рівня наповненості резервуару, при якому всі умови граничних станів першої та другої груп, з урахуванням аварійних станів при сейсміці, виконувалися б повністю. Встановлено, що для більшості існуючих сталевих резервуарів цей рівень коливається в межах 60 ... 70% від проектного.

3. Базуючись на сучасних досягненнях науки і техніки в Україні та за кордоном, розроблено модель поведінки реологічного-середовища (рідкого продукту) всередині ємності під дією сейсмічних впливів, шляхом заміни середовища імпульсивною та конвективною масами. Оцінено силовий інерційний вплив на стінки резервуарів від рідкого продукту за розробленою моделлю.

4. Запропоновано методику оцінки збуреної сейсмічними впливами хвилі на поверхні резервуару, що дозволяє у подальшому, виключити понаднормативних впливів на кришку великорозмірних резервуарів будь-якої місткості та форми.

5. Вказані результати були верифіковані на прикладі реальної споруди, запроектованої та побудованої в кінці минулого століття на одному з хімічних підприємств у м. Южне Одеської області для зберігання метанолу. Для неї за запропонованою методикою були розроблені аналітична та скінчено-елементна моделі напружено-деформованого стану. Результати дослідження дозволили отримати суттєві практичні результати. Було зроблено висновок, що ця споруда не відповідає сучасним вимогам до стійкості і надійності будівельних конструкцій резервуарів. Зокрема, за умови прикладання проектних навантажень, конструкція перевантажена як при гідростатичних випробуваннях, так і при проектному вакуумі. Було виявлено, що для будівельних конструкцій найбільш небезпечним є вплив вакууму з урахуванням впливу вітру. Враховуючи запропоновані методики було встановлено експлуатаційні обмеження, такі як, обмеження рівня вакууму (не більше 23 мм вод ст.) та обмеження висоти заповнення резервуару корисним продуктом (не більше 11 м).

6. Важливим висновком щодо аналізу стану існуючих нормативних джерел з проектування резервуарів є те, що надійна методика моделювання сейсмічних впливів на резервуари в вітчизняних нормах, відсутня. Проектувальникам пропонується використовувати методику запропоновану колективом авторів В.О. Поповим, О.В. Войцехівським, І.Р. Сазоновою та Д.М. Байдою, що викладена у [1, 5, 7], і апробовану у цій науковій роботі.

7. У магістерській роботі був виконаний комплекс наукових задач, а саме:

- Здійснений аналіз сучасних вимог технічних нормативних документів та стандартів дозволив визначити основні вимоги до проектування, виготовлення та експлуатації таких резервуарів.
- Дослідження характеристик матеріалів, що використовуються для виготовлення резервуарів, сприяло глибокому розумінню їхніх механічних властивостей, міцності та довговічності.
- Вивчення впливу зовнішніх факторів, таких як температура, вітер, вологість, сонячна радіація і т.д., на роботу резервуарів дозволило розробити оптимальні умови для експлуатації резервуарів.

- Розробка аналітичних та скінчено-елементних моделей напружено-деформованого стану конструкцій резервуарів забезпечила можливість прогнозування їхньої поведінки під навантаженням та виявлення можливих проблемних зон. Це сприяло поліпшенню конструкції резервуарів та забезпеченню їх безпеки та ефективності.

- В результаті пошуку раціональних конструктивних та експлуатаційних параметрів існуючих резервуарів було досягнуто зниження собівартості робіт з їх реконструкції.

8. Результати дослідження можуть бути використані в інженерній практиці при проектуванні та будівництві великорозмірних сталевих циліндричних резервуарів для зберігання неагресивних рідин. Запропоновані методики можуть допомогти інженерам та конструкторам визначити оптимальні розміри та параметри сталевих циліндричних резервуарів, що забезпечать їх ефективну роботу та безпеку під час експлуатації. Таким чином, науково-технічні дослідження, виконані автором магістерської роботи, в галузі раціонального проектування будівельних великорозмірних споруд резервуарів мають велике значення для практичного застосування в інженерній практиці та будівництві.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Попов В.О., Попова А.В. Аналітичне моделювання напружено-деформованого стану резервуару для зберігання метанолу від технологічних та кліматичних впливів. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві : науково-технічний збірник. Вінниця : ВНТУ, 2021. 87 – 98 с.  
URL:<https://stmkvb.vntu.edu.ua/index.php/stmkvb/article/view/713>
2. ДБН В.1.2-14:2018. Система забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. [На заміну ДБН В.1.2-14-2009; чинний від 2019-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2009. 30 с.
3. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. [На заміну СНиП 2.01.07-85, за винятком розділу 10; чинний від 2007-10-01]. Вид. офіц. Київ : Мінбуд України, 2006. 71 с.
4. ДБН В.2.6-168:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. [На заміну ДБН В.2.6-163:2010 у частині розділу 1 та ДСТУ Б В.2.6-194:2013; чинний від 2015-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2014. 199 с.
5. Попов В.О., Войцехівський О.В., Криклива К.П. Сейсмостійкість великорозмірного резервуару для зберігання метанолу. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві : науково-технічний збірник. Вінниця : ВНТУ, 2023. С. 5 – 19
6. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Прогини і переміщення. Вимоги проектування. [На заміну розділу 10 СНиП 2.01.07-85; чинний від 2007-01-01]. Вид. офіц. Київ: Мінбуд України, 2006. 10 с.
7. Байда Д.М., Сазонова І.Р. Особливості розрахунку сталевих резервуарів при дії сейсмічних впливів. Будівництво в сейсмічних районах України. Будівельні конструкції : наук.-тех. збір. Київ, 2012. С.154–159
8. Типовий проект сталевих вертикальних циліндричних резервуарів для нафти та нафтопродуктів. URL:  
<https://meganorm.ru/Data2/1/4293849/4293849805.pdf>

9. Генкин А. Э. Оборудование химических заводов: учеб. пособие для техникумов. Москва: Высш. Шк., 1986. 280 с.
10. Лихтарников Я.М., Клыков В.М, Ладыжевский Д.В. Расчет стальных конструкций. *Справочное пособие*. Киев, 1976. С.350
11. СНиП 2.09.03-85. Сооружения промышленных предприятий. [Действующий с 1987-01-01]. Изд. офиц. Москва: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. 57 с.
12. СТО-СА-03.003-2009. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет на сейсмические воздействия. [Действующий с 2009-12-23]. Изд. офиц. Москва, 2009. 77 с.
13. ВБН В.2.2-58.2-94. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа. [Чинний від 1994-08-04]. Вид. офіц. Київ : Укрнафтопродукт, 1994. 98 с.
14. EN 1993-4-1. Design of steel structures: Eurocode 3. [Effective from 2006-12-06]. Issued in Brussels: European committee for standardization, 2007. 117 p. URL:<https://www.phd.eng.br/wpcontent/uploads/2015/12/en.1993.4.1.2007.pdf>
15. Благиных Е.А. Большепролетные конструкции общественных зданий : конспект лекций. Новокузнецк : СибГИУ, 2013. 70 с.
16. Конструктивные решения железобетонных оболочек. *Научный электронный журнал*. Москва, 2018. №3. С.20-27 URL:<https://industrial-wood.ru/zhelezobetonnye-konstrukcii/11401-konstruktivnye-resheniya-zhelezobetonnyh-obolochek.html> (дата звернення: 11.02.2023)
17. Моментная теория расчета тонкостенных оболочек. Основные положения теории оболочек. Безмоментная теория оболочек. *Научный электронный журнал*. Москва, 2015. №8. С.43-50 URL:<https://motherhouse.ru/disputes-with-neighbors/momentnaya-teoriya-rascheta-tonkostennyh-obolochek-osnovnye/> (дата звернення: 11.02.2023)
18. Wong K.V., Hernandez A. A Review of Additive Manufacturing. ISRN Mechanical Engineering: article. USA: University of Miami, 2012. 10 p.

19. Jandric Z., Labudovic M., Kovacevic R. Effect of heat sink on microstructure of three-dimensional parts built by welding-based deposition. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2004. 15 Jan. No.785. 8 p.
20. Веселова Е.А., Комарова М.Л. Исследование архитектурно-конструктивных особенностей купольных покрытий зданий. *Архитектурные решения объектов строительства и реконструкции*. 2011, 20-26 окт. (№42). С.14-15
21. Види резервуаров для хранения нефтепродуктов. *Наука и инновации*. URL:<https://uralneftemash.com/blog/vertikalnye-stalnye-rezervuary-raznovidnosti-i-primenenie/> (дата звернення: 14.02.2023)
22. Хоменко Ю. О., Шейко В. М. Корозія металів та методи захисту : наук.-тех. посіб. Київ : Кам'яний Хрест, 2011. 130 с.
23. Гордієнко О. С. Діагностика механічних пошкоджень сталевих резервуарів. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. 2014. №29. С. 127-131.
24. Бурлацький В. О. Хімічна стійкість і довговічність захисних покриттів для резервуарів. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2015. № 1. С. 157-160.
25. Величко В. П., Тараненко О. О. Причини втрати герметичності великих резервуарів та способи їх усунення. *Науковий вісник будівництва*. 2016. № 92. С. 89-93.
26. Гладишевський М. І., Баранова О. М. Тріщиностійкість матеріалів резервуарів при термічних напруженнях. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2013. №1. С. 30-34.
27. Мельник О. В. Корозія металів і захист від корозії. *Актуальні задачі сучасних технологій* : матеріали ІХ міжнар. наук.-тех. конф., м. Тернопіль, 25-26 лис. 2020 р. Тернопіль, 2020. С. 23-26.
28. Бабич Є. М., Караван В. В., Бабич В. Є. Діагностика, паспортизація та відновлення будівель і інженерних споруд: підручник. Рівне: Волинські обереги, 2018. 176 с.



29. ДСТУ Б В.2.6-193:2013. Захист металевих конструкцій від корозії. Вимоги до проектування. [На заміну СНиП 2.03.11-85 у частині металевих конструкцій; чинний від 2014-01-01]. Вид. офіц. Київ : Мінрегіон України, 2014. 13 с.
30. Бик М. В., Букет О. І., Васильєв Г. С. Методи захисту обладнання від корозії та захист на стадії проектування : навч. посіб. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 318 с.
31. Стоєв П. І., Литовченко С. В., Гірка І. О., Грицина В. Т. Хімічна корозія та захист металів : навч. посіб. Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2019. 216 с.
32. Григоров А. Б. Зберігання нафти та нафтопродуктів в умовах нафтобаз : навч. посіб. Харків : НТУ, 2022. 184 с.
33. Бурау Н.І., Лук'янченко О.О., Костіна О.В., Цибульник С.О. Структурний моніторинг вертикальних сталевих резервуарів : монографія. Київ : Центр учбової літератури, 2019. 160 с.
34. Бугай Ю. М.; Глоба В. М. Спорудження нафтобаз і газонафтосховищ : навч. посіб. Київ : ВПОЛ, 2000. 606 с.
35. Попов В. О., Криклива К. П. *Оптимізація експлуатаційних параметрів існуючих вертикальних металевих циліндричних резервуарів*: матеріали ЛІІ наук.-тех. конф. підрозділів ВНТУ, м. Вінниця, 14-23 березня 2023 р. Вінниця, 2023. С.133-136
36. ДСТУ Б Д.1.1-1:2013. Правила визначення вартості будівництва. [На заміну ДБН Д.1.1-1-2000; чинний від 2014-01-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2013. 100 с.
37. ДСТУ Б Д.2.4-20:2012. Ресурсні елементні кошторисні норми на ремонтно-будівельні роботи. Інші ремонтно-будівельні роботи. [На заміну ДБН Д.1.1-1-2000; чинний від 2014-01-01]. Вид. офіц. Київ: Мінрегіон України, 2014. 25 с.
38. Програмний комплекс: Автоматизований випуск кошторисів. URL: <https://avk5.com.ua/> (дата звернення: 09.05.2023)

39. Беловол В.В. Нормування праці та кошториси в будівництві : навч. посіб. Суми : ВВП Мрія-1 ЛТД, 2000. 451 с.
40. Богоявленська Ю.В. Проектний аналіз : навч. посіб. Київ: Кондра, 2004. 336 с.
41. Дука А.П. Аналіз інвестиційних проектів : навч. посіб. Київ, 2010. 240 с.
42. Бардіш Г.О. Проектний аналіз : навч. посіб. 2-ге вид. Київ : Знання, 2006. 415 с.
43. Методичні рекомендації по оцінці ефективності інвестиційних проектів / за ред.: колект. Інстит. систем. аналізу РАН, Центр. економіко-математич. інст. РАН та ін. – Миколаїв: інст. РАН, 2004. 218 с.
44. Коссов В.В., Лившиц В.Н., Шахназаров А.Г. Методические рекомендации по оценке инвестиционных проектов : офиц. издан. Москва: Экономика, 2000. 421 с.
45. Скопенко Н.С. Основні підходи до визначення доцільності та ефективності інтеграційної взаємодії суб'єктів господарювання. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. Київ, 2013. № 52. С. 186-196. URL: <http://dspace.nuft.edu.Ua/jspui/bitstream/123456789/15060/1/NUFT2013.pdf>. (дата звернення: 12.04.2023)
46. Балашова Р.І. Оцінка ефективності діяльності підприємств нових форм господарювання на основі показників ресурсозбереження: автореф. дис. ... канд. екон. наук : 08.06.01. Донецьк, 1999. 24 с.
47. Мочерний С.В., Основи економічних знань : навч. посіб. Київ : Академія, 2000. 303 с.
48. Мельник Л.Г., Корінцева О.Л. Економіка підприємства : навч. посіб. Суми : Університетська книга, 2004. 416 с.
49. Поливана Л. А. Методичні підходи до оцінки ефективності проекту впровадження інформаційних технологій на підприємствах торгівлі. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. Харків, 2014. № 149. С. 247-259.

URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg\\_2014\\_149\\_38](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vkhdtusg_2014_149_38) (дата звернення:  
15.04.2023)

50. Попович П.Я. Економічний аналіз діяльності суб'єктів господарювання : навч. посіб. Київ : ІНФРА, 2012. 630 с.

## ДОДАТКИ

ДОДАТОК А  
ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

110

ДОДАТОК А  
ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ МАГІСТЕРСЬКОЇ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ  
НА НАЯВНІСТЬ ТЕКСТОВИХ ЗАПОЗИЧЕНЬ

Назва роботи: Великорозмірні сталеві циліндричні резервуари для зберігання неагресивних рідин

Тип роботи: Магістерська кваліфікаційна робота  
(БДР, МКР)

Підрозділ кафедра БМГА, ФБЦЕІ  
(кафедра, факультет)

**Показники звіту подібності Unicheck**

Оригінальність 94,6 % Схожість 5,4 %

Аналіз звіту подібності (відмітити потрібне):

1. Запозичення, виявлені у роботі, оформлені коректно і не містять ознак плагіату.
2. Виявлені у роботі запозичення не мають ознак плагіату, але їх надмірна кількість викликає сумніви щодо цінності роботи і відсутності самостійності її виконання автором. Роботу направити на розгляд експертної комісії кафедри.
3. Виявлені у роботі запозичення є недобросовісними і мають ознаки плагіату та/або в ній містяться навмисні спотворення тексту, що вказують на спроби приховування недобросовісних запозичень.

Особа, відповідальна за перевірку

(підпис)

Блащук Н.В.

(прізвище, ініціали)

Ознайомлені з повним звітом подібності, який був згенерований системою Unicheck щодо роботи.

Автор роботи

(підпис)

Криклива К.П.

(прізвище, ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Попов В.О.

(прізвище, ініціали)

ДОДАТОК Б  
ВІДОМІСТЬ АРКУШІВ ГРАФІЧНОЇ ЧАСТИНИ

Аркуш	Найменування	Примітки
1	2	3
1	Наукова новизна та практичне значення	Плакат
2	Мета наукової роботи та наукові задачі	Плакат
3	Апробація і публікації	Плакат
4	Класифікація тонкостінних оболонок	Плакат
5	Загальний вигляд ємності	Плакат
6	Конструктивна схема ємності	Плакат
7	Загальний вигляд та технічний стан ємності №Е5А	Плакат
8	Напружено-деформований стан елементарного фрагмента бічної стінки	Плакат
9	Типові дефекти і пошкодження резервуарів	Плакат
10	Розподіл вітрового тиску та вакууму при вітрі на конструкції ємності	Плакат
11	Скінчено-елементна модель напружено-деформованого стану	Плакат
12	Тривимірне відображення моделі: ємності в цілому та опорного металокаркасу сферичного даху разом з опорним кільцем	Плакат
13	Деформації і еквівалентні напруження	Плакат
14	Втрата стійкості бічних стінок за 1-ю формою	Плакат
15	Моделювання сейсмічних впливів	Плакат
16	Вплив гідродинамічних тисків	Плакат
17	Економічний ефект пропонованого рішення	Плакат
18	Висновки	Плакат



## Наукова новизна

розробка методики аналізу напружено-деформованого стану великорозмірних резервуарів для раціонального проектування

на основі виконаних досліджень, запропоновано метод, який дозволяє оцінити граничну висоту і, відповідно, граничну місткість існуючих резервуарів, для довільного корисного продукту без підсилення основних несучих елементів, що дозволяє без значних капітальних вкладень експлуатувати споруду за призначенням

на основі сучасного та закордонного досвіду розроблено модель поведінки реологічного-середовища (рідкого продукту) всередині ємності під дією сейсмічних впливів, оцінено силовий інерційний вплив на стінки резервуарів від рідкого продукту

запропоновано методику оцінки збуреної сейсмічними впливами хвилі на поверхні резервуару, що дозволяє у подальшому, виключити понаднормативні впливи на кришку великорозмірних резервуарів будь-якої місткості та форми.

Розробка інженерних рішень щодо раціонального обмеження ступеня вакууму у резервуарах

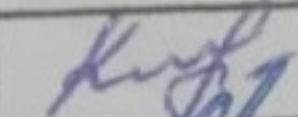
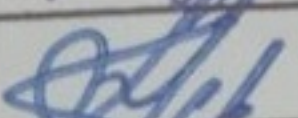

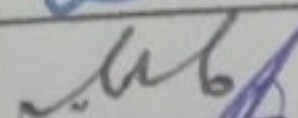
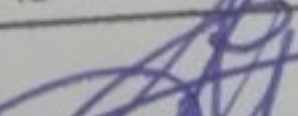
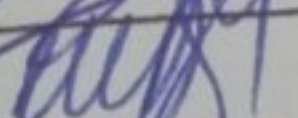
Практичне значення

розроблено практичні рекомендації щодо обмеження місткості існуючих резервуарів



08-11.МКР.013 - КМ

Великорозмірні сталеві циліндричні резервуари для зберігання неагресивних рідин

Змін	Кільк.	Аркуш	Недок.	Підпис	Дата	Вступ	Стадія	Аркуш	Аркушів	
Розробив		Криклива К.П.			15.05.23		Вступ	П	1	
Перевірив		Попов В.О.			15.06	Наукова новизна та практичне значення				
Керівник		Попов В.О.			15.06		ВНТУ, гр. Б-21 м			
Норм.контроль		Маєвська І.В.			15.06					
Опонент		Степанов Д.В.			15.06					
Затвердив		Швець В.В.								



**Мета наукової роботи** полягає у оптимізації конструкції та режимів експлуатації великорозмірних резервуарів на основі ґрунтовних досліджень їх напружено-деформованого стану. Вказані дослідження мають на меті, також, визначити найбільш ефективні та безпечних підходів до реконструкції, нового будівництва та експлуатації резервуарів.





## Апробація:

4

Основні матеріали МКРд оповідалися на ІІ науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 14-23 березня 2023 р.

## Публікації:

За матеріалами магістерської кваліфікаційної роботи опубліковані дві друковані праці, одна з яких у – професійному фаховому виданні.

- Попов В.О., Войцехівський О.В., Криклива К.П. Сейсмостійкість великорозмірного резервуару для зберігання метанолу. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Науково-технічний збірник. Вінниця, ВНТУ, 2023-1. С. 5 – 19 . (Фахове видання)
- Криклива К. П. Оптимізація експлуатаційних параметрів існуючих вертикальних металевих циліндричних резервуарів [Електронний ресурс] / В. О. Попов, К. П. Криклива // Матеріали ІІ науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 14-23 березня 2023 р. – Електрон. текст. дані. – 2023 . – Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2023/paper/view/17453>.
- Ще одна публікація з цієї тематики подана до редакції та, найближчим часом, буде опублікована.



## Класифікація тонкостінних оболонок

матеріал виготовлення	функціональне призначення	форма конструкції	спосіб монтажу	конструктивні особливості
<ul style="list-style-type: none"> <li>• метал</li> <li>• залізобетон</li> <li>• дерево</li> <li>• пластмаса</li> <li>• композитні</li> <li>• керамічні</li> <li>• скляні</li> <li>• полімерні</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• резервуари</li> <li>• газгольдери;</li> <li>• бункери</li> <li>• силоси</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• вертикальні циліндричні;</li> <li>• горизонтальні циліндричні;</li> <li>• краплевидні;</li> <li>• траншейні</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• наземні/незаглиблені</li> <li>• підземні/заглиблені</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• з конічним щитовим покриттям;</li> <li>• із сферичним покриттям</li> </ul>





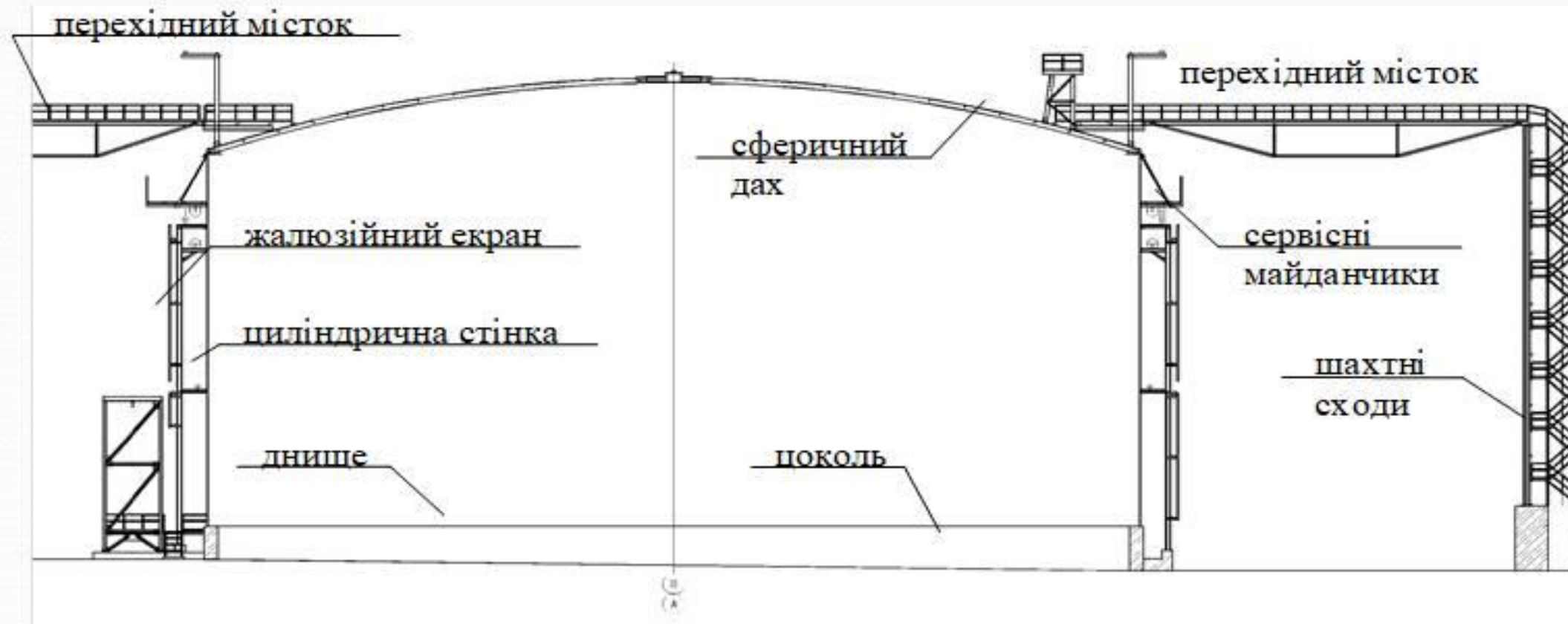
## Загальний вигляд ємності



1 - Патрубок приемо-раздаточный (ПРП), 2 - Патрубок вентиляционный (ПВ), 3 - Кран сифонный (КС), 4 - Система компенсации нагрузок от приемо-раздаточных патрубков на стенку резервуара (СКНР), 5 - Люк-лаз (ЛЛ), 6 - Пробоотборник секционный (ПСР), 7 - Хлопушка с перепуском, 8 - Механизмы управления хлопушками (МУ, МУВ), 9 - Плавающее заборное устройство (ПЗУ), 10 - Пробоотборник секционный органного типа (ПСР-ОТ), 11 - Пробоотборник плавающий сниженный (ПП), 12 - Устройство для размыва донных отложений, 13 - Приемо-раздаточное устройство (ПРУ) с поворотной заслонкой, 14 - Клапан предохранительный гидравлический (КПГ), 15 - Клапан дыхательный механический (КДМ), 16 - Клапан дыхательный непримерзающий мембранный (НДКМ), 17 - Клапан совмещенный механический дыхательный (СМДК), 18 - Люк световой (ЛС), 19 - Огнепреградитель (ОП), 20 - Клапан дыхательный (КДС), 21 - Люк замерный (ЛЗ), 22 - Камера низкократной пены (КНП), 23 - Генератор пены средней кратности стационарный (ГПСС), 24 - Клапан аварийный



## Моделювання циліндричної ємності для зберігання метанолу об'ємом 20 000 м<sup>3</sup> з урахуванням зносу і деформацій



Конструктивна схема ємності №Е5А.

Технічні характеристики ємності №Е5А:

- внутрішній діаметр обичайки	39,9 м
- висота циліндричної частини	17,89 м
- радіус сферичного даху	60,0 м
- висота сегмента сферичного даху	3,4 м
- загальна висота споруди від рівня цоколя	21,52 м
Загальна площа забудови, обмежена залізобетонними стінками	4 900 м <sup>2</sup> .
Корисний об'єм	20 000 м <sup>3</sup> .
Будівельний об'єм надземної частини	27 440 м <sup>3</sup> .

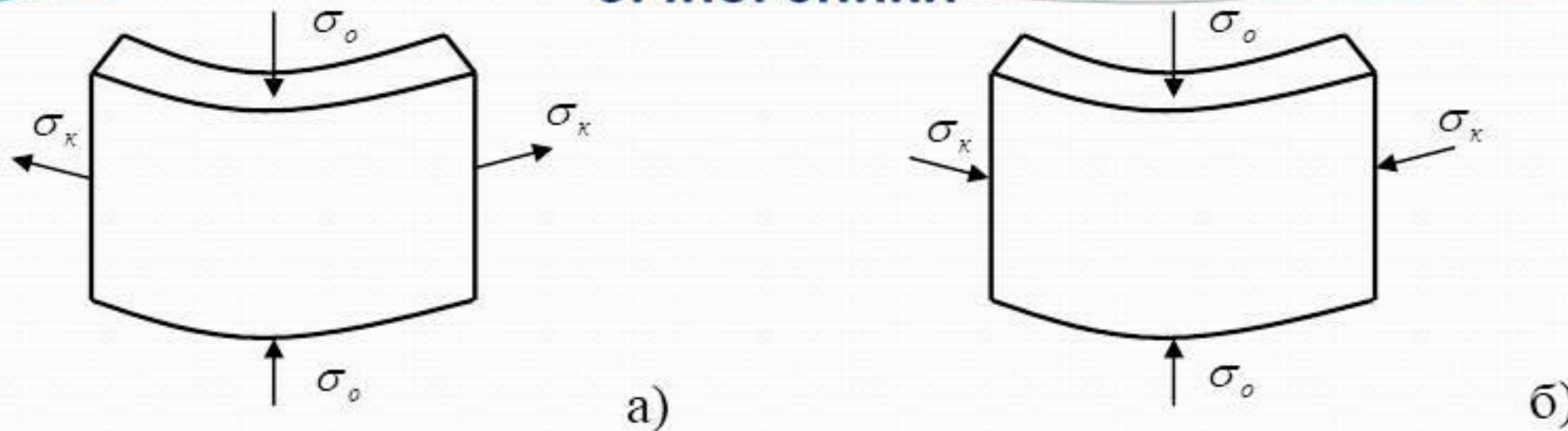


# Загальний вигляд та технічний стан ємності №Е5А





## Напружено-деформований стан елементарного фрагмента бічної стінки 9



Напружений стан елемента циліндричної обичайки (стілки) ємності: а – при гідростатичних випробуваннях, б – при вакумі та порожній ємності в момент ураганного вітру.

Умова міцності:

$$\sigma_{екв} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y^2 + 3 \cdot \tau_{xy}^2} \leq [\sigma] = \gamma_c \cdot R_y$$

Умова стійкості замкненої циліндричної оболонки обертання, що знаходиться під впливом двох стискаючих зусиль:

$$\frac{\gamma_n}{\gamma_c} \cdot \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_{cr,1}} + \frac{\sigma_2}{\sigma_{cr,2}} \right) \leq 1,$$

$$\sigma_{cr,1} = \sigma_{k,cr} = 0,55 \cdot \gamma_{fm2} \cdot E \cdot \left( \frac{r}{H_\epsilon} \right) \cdot \left( \frac{\Delta_c}{r} \right)^{3/2}, \quad \sigma_{cr,2} = \sigma_{o,cr} = \frac{c_i \cdot E \cdot \Delta_i}{r}, \text{ [МПа]},$$

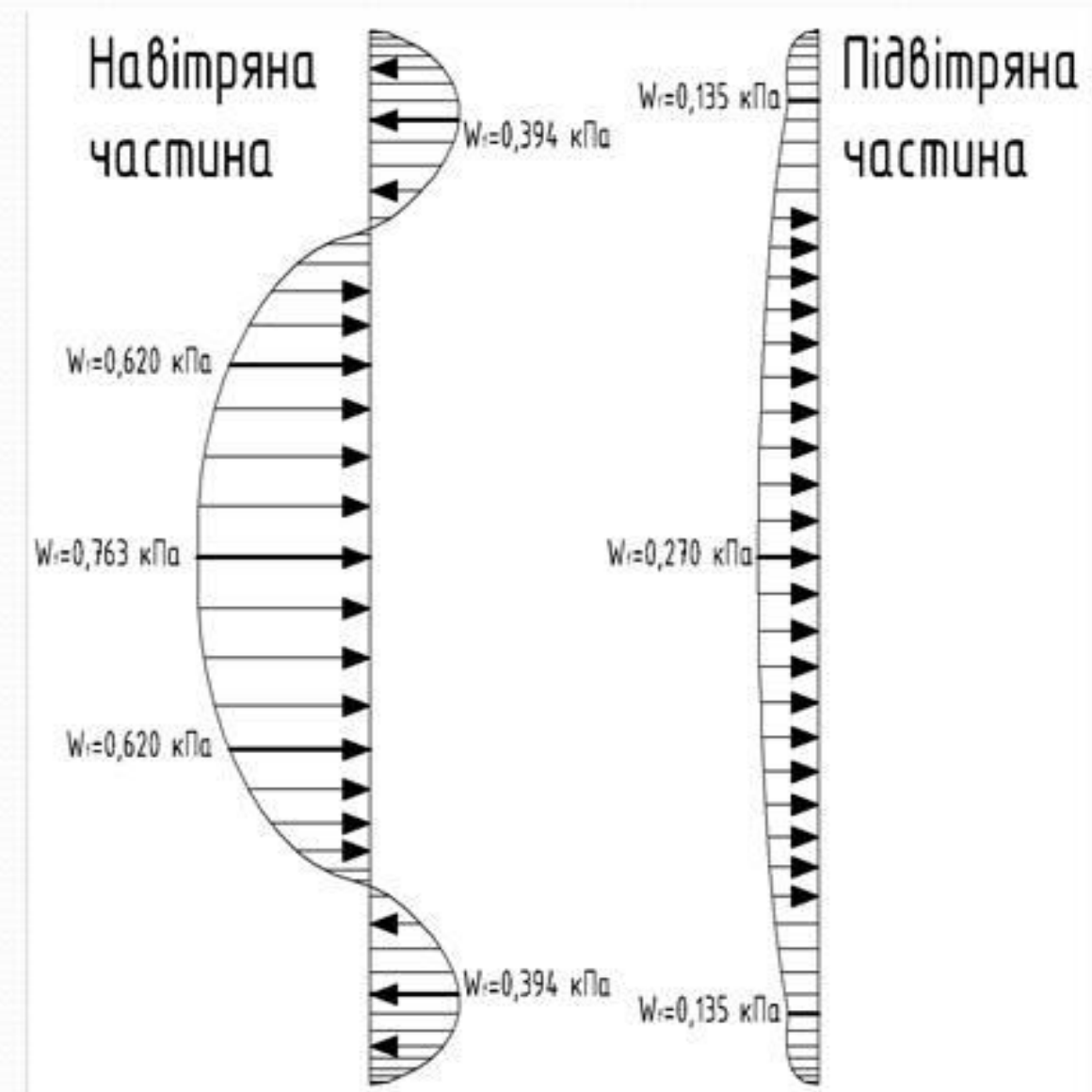
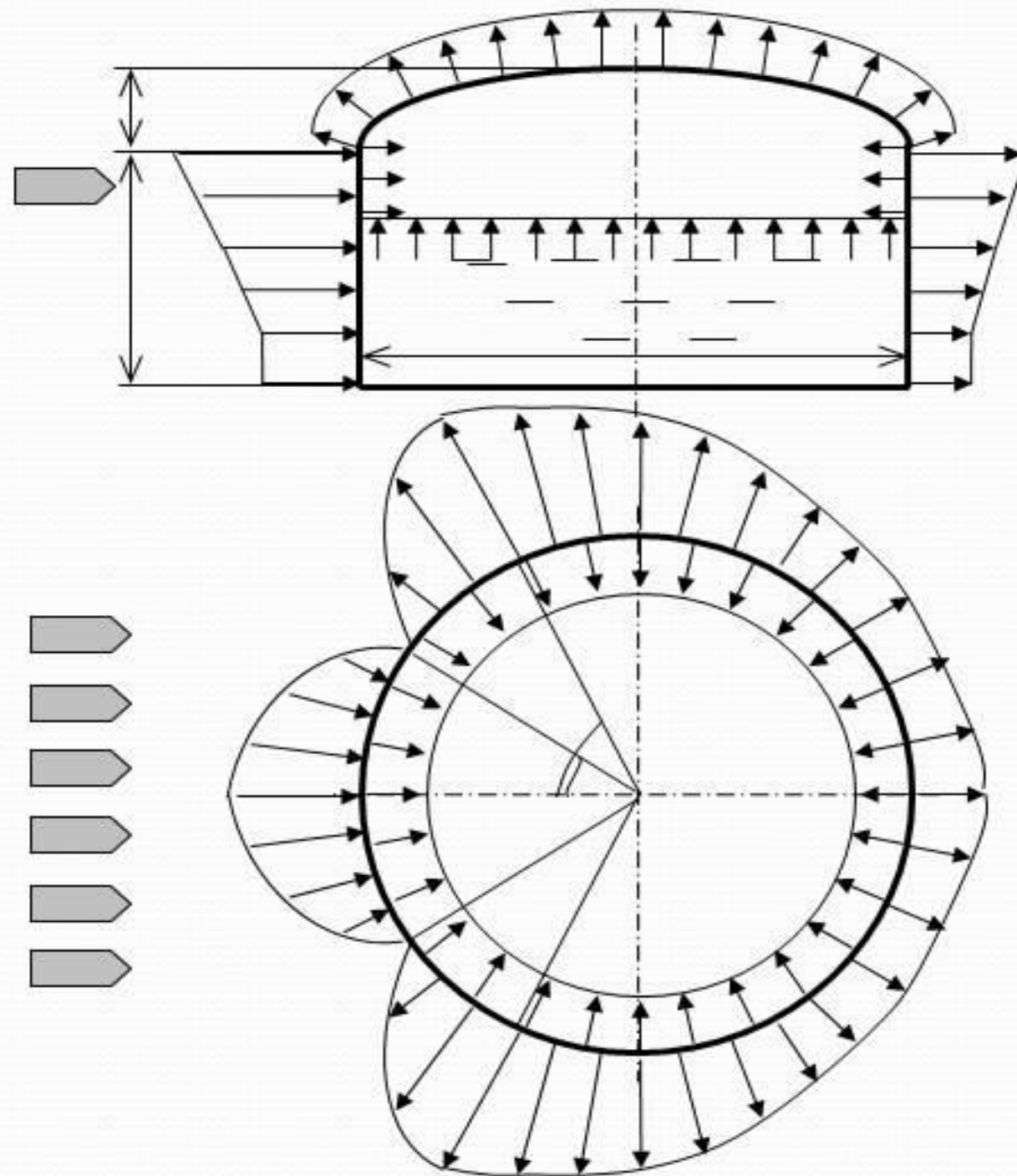
# Типові дефекти і пошкодження резервуарів



- ✓ Застосування захисних покриттів
- ✓ Катодний захист
- ✓ Використання корозійностійкої сталі
- ✓ Захист від вологи
- ✓ Регулярний моніторинг і технічне обслуговування
- ✓ Інгібітори корозії



## Розподіл вітрового тиску та вакууму при вітрі на конструкції ємності



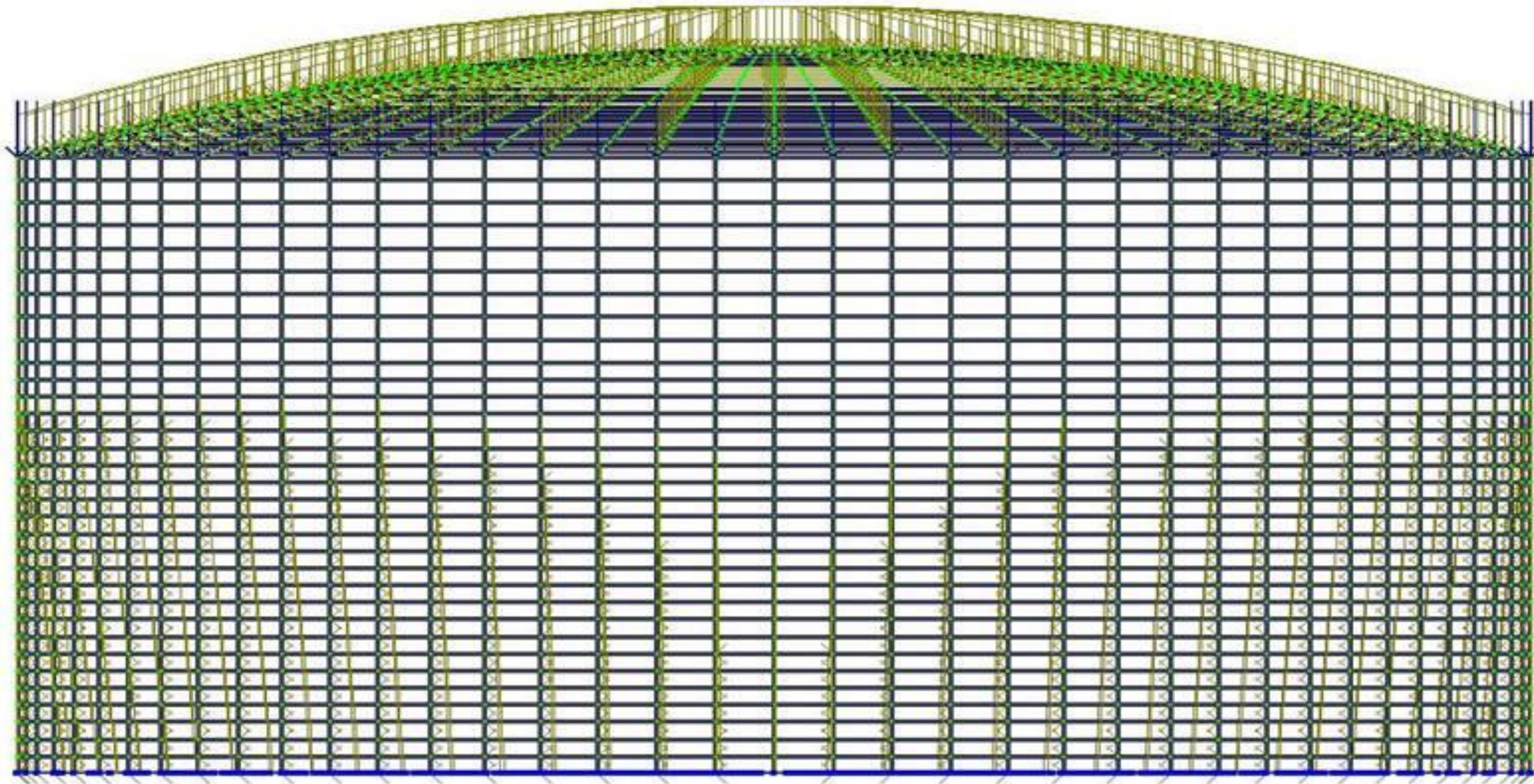
Епюра горизонтальних тисків та відтоку на стінки обичайки ємності в рівні цоколя в проекції на вертикальну площину симетрії ємності, перпендикулярну вітровому потоку.



# Скінчено-елементна модель напружено-деформованого стану

12

Перша основна комбінація навантажень

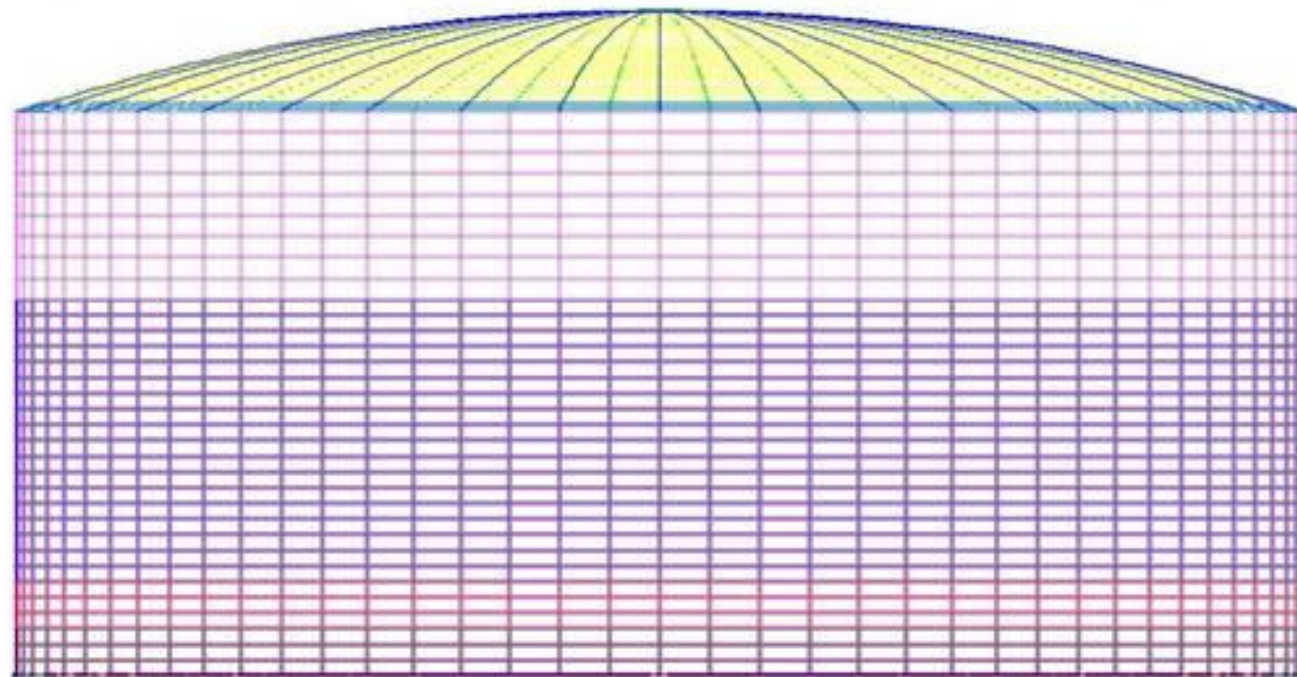


Модель під впливом гідростатичного тиску від метанолу висотою 11 м та надлишкового тиску азоту 400 мм вод. ст.

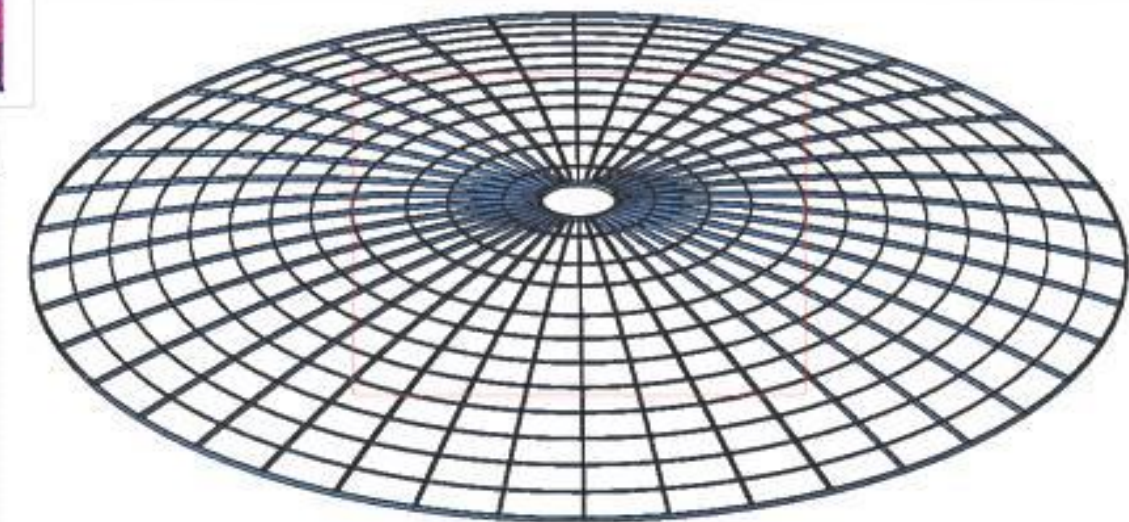
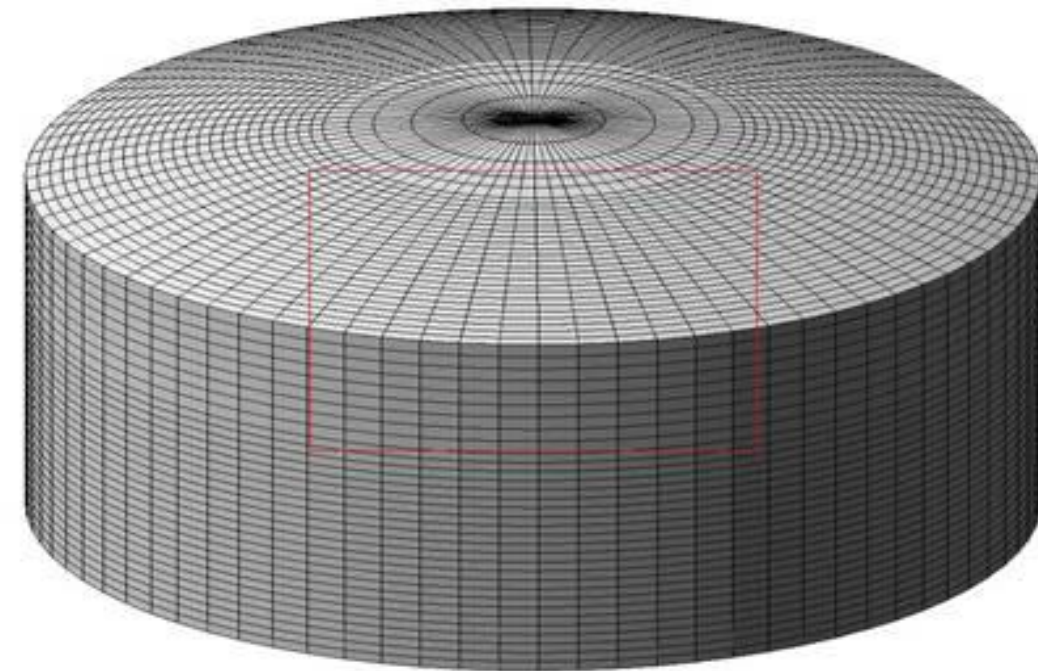


# Скінчено-елементна модель напружено-деформованого стану

13



Скінчено-елементна модель ємності. Жорсткості показані відповідними кольорами



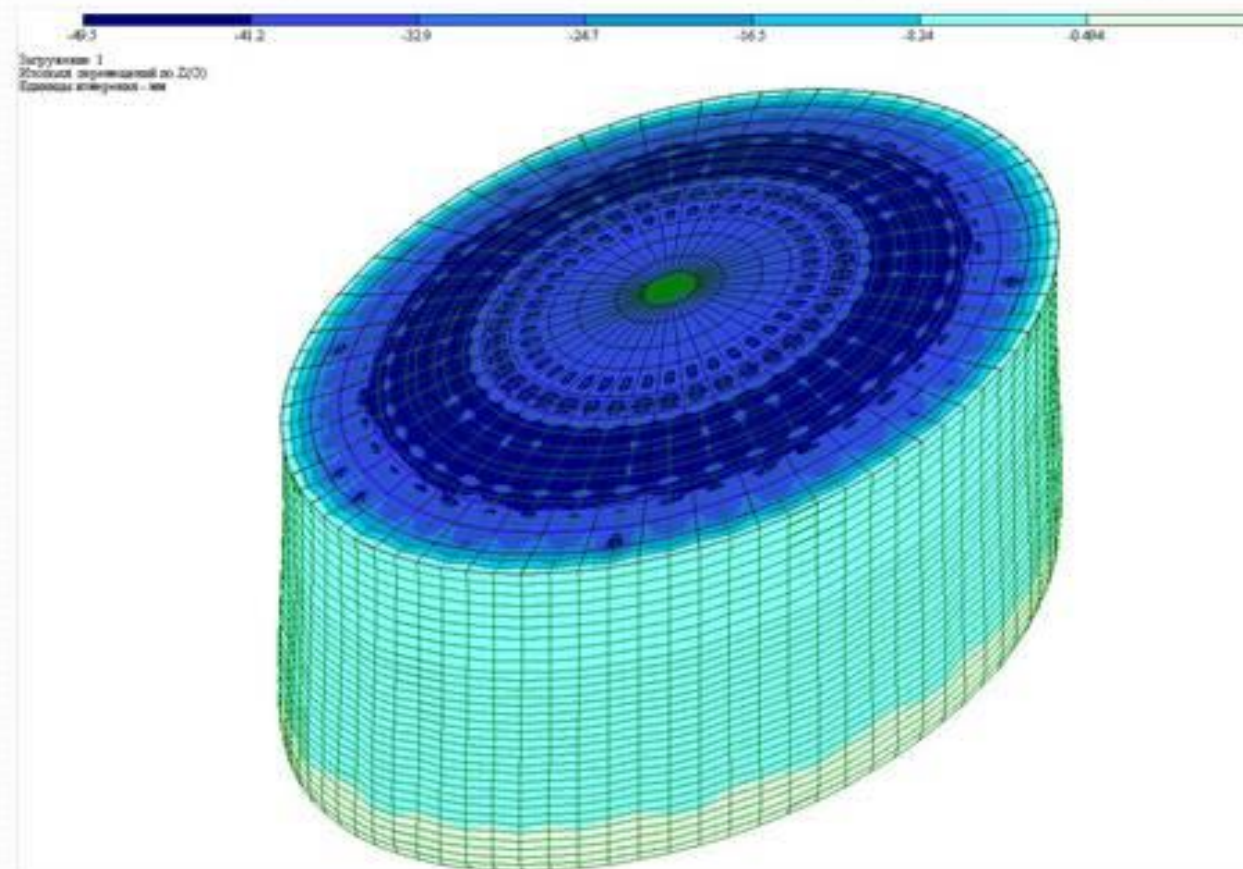
Тривимірне відображення моделі: ємності в цілому та опорного металокаркасу сферичного даху разом з опорним кільцем



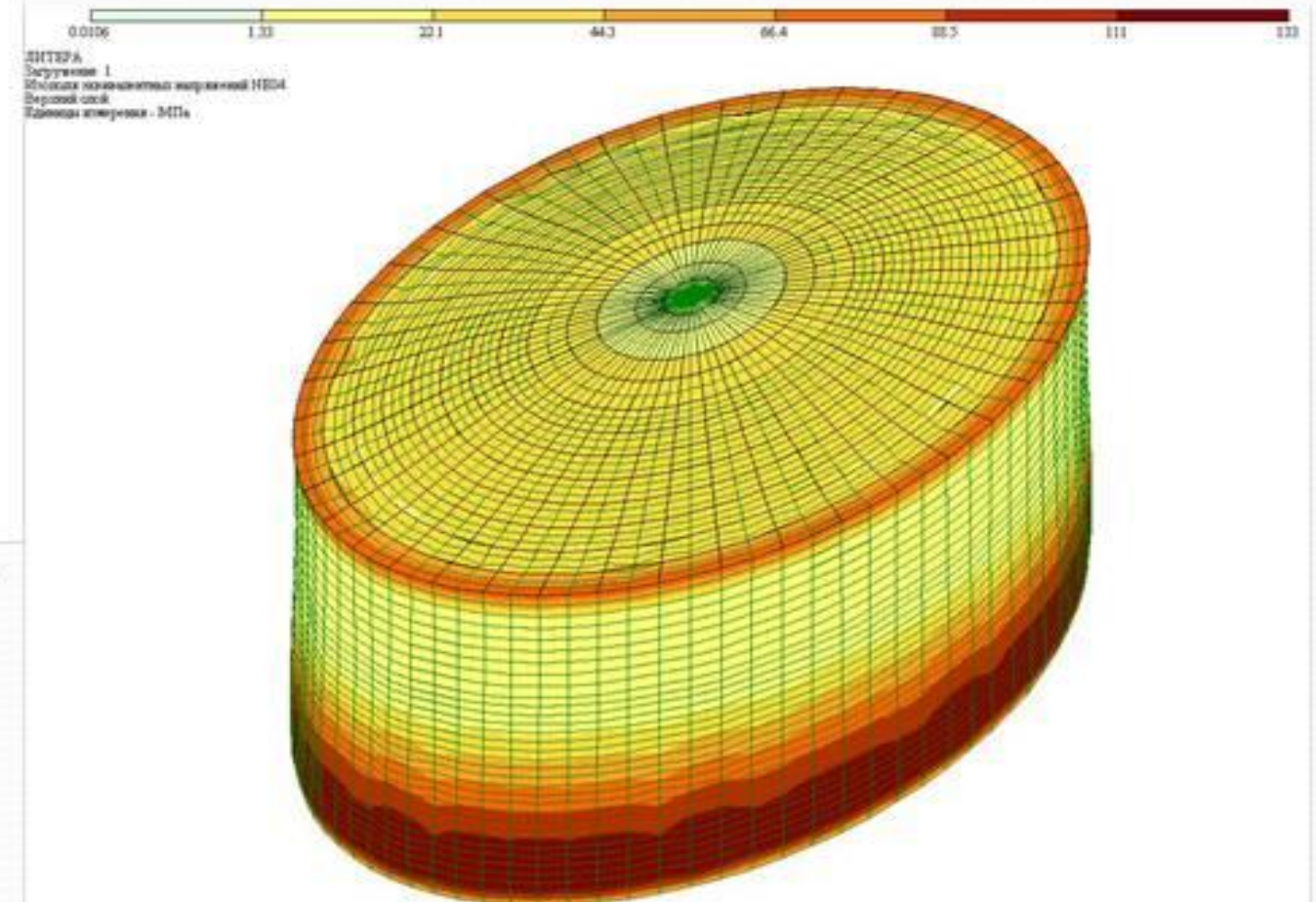
# Результати скінчено- елементного моделювання

## Деформації і еквівалентні напруження

14



Деформації металоконструкції ємності від гідростатичного тиску метанолу в напрямку  $Oz$  (по вертикалі).



Еквівалентні напруження у елементах ємності від гідростатичного тиску метанолу (деформації для наочності збільшено у 20 разів).

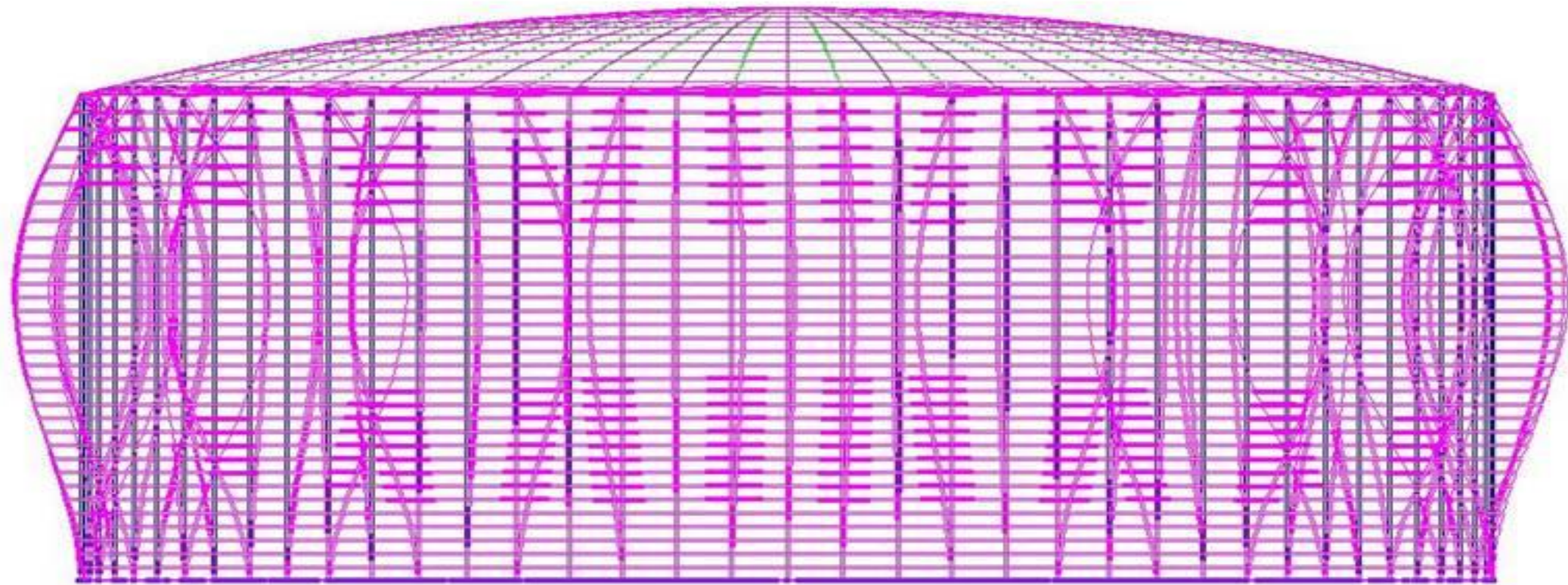


# Результати скінчено-елементного моделювання

15

## Втрата стійкості бічних стінок за 1-ю формою

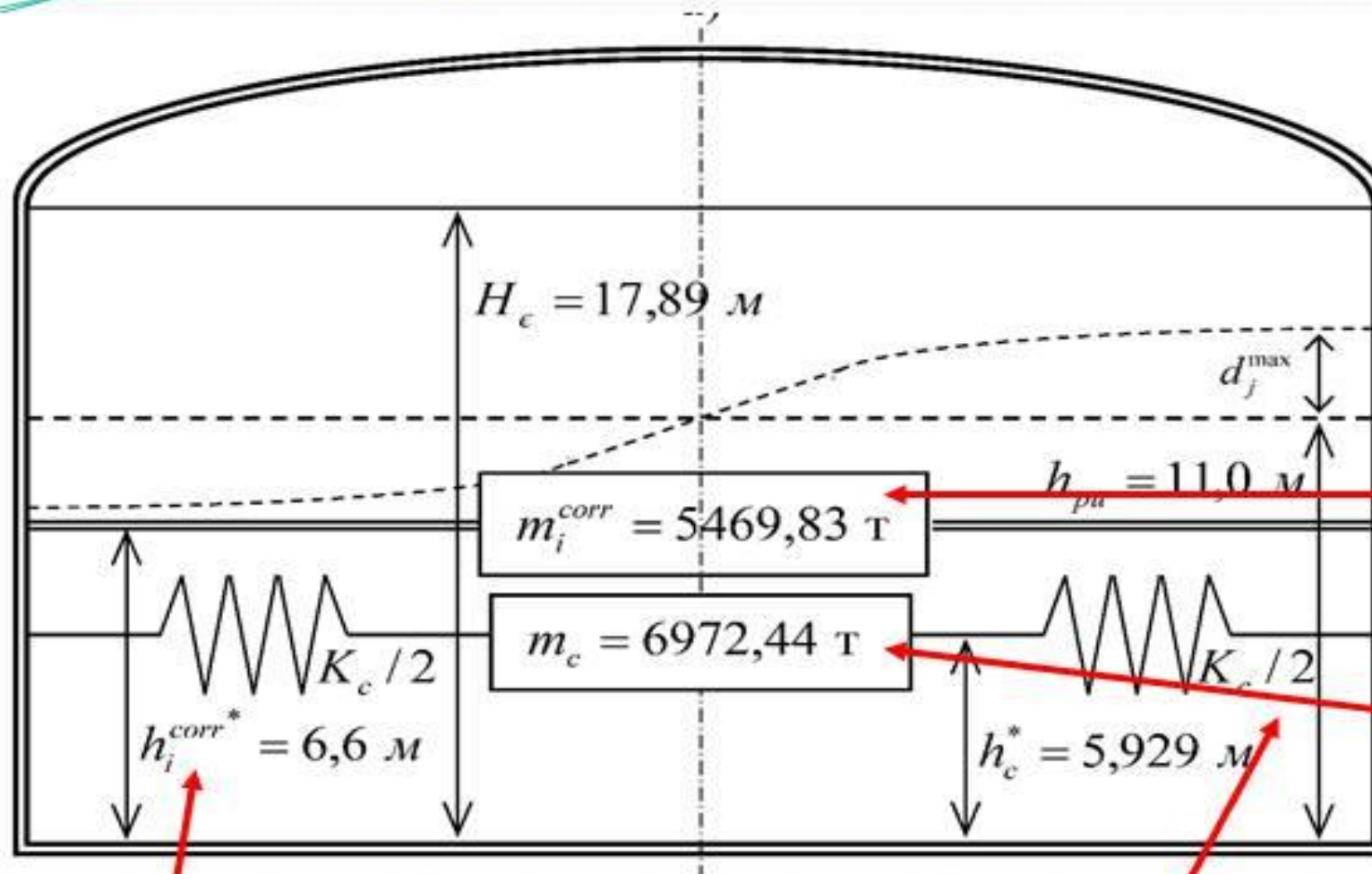
Завантаження 1  
Форма втрати стійкості в шт. с. 1  
Коефіцієнт 3.04728



Перша форма втрати стійкості форми бічних стінок ємності.



## Моделювання сейсмічних впливів



$$m_i = \frac{th(0,866/\gamma)}{0,866/\gamma} \cdot m$$

$$m_i^{corr} = m_i + m_s$$

$$m_c = \frac{0,23}{\gamma} \cdot th(3,68 \cdot \gamma) \cdot m$$

$$h_i^{corr*} = \frac{m_i \cdot h_i^* + m_s \cdot h_s}{m_i + m_s}$$

$$K_c = \frac{0,846 \cdot m \cdot g}{h_{pu}} \cdot th^2(3,68 \cdot \gamma)$$

# Моделювання сейсмічних впливів

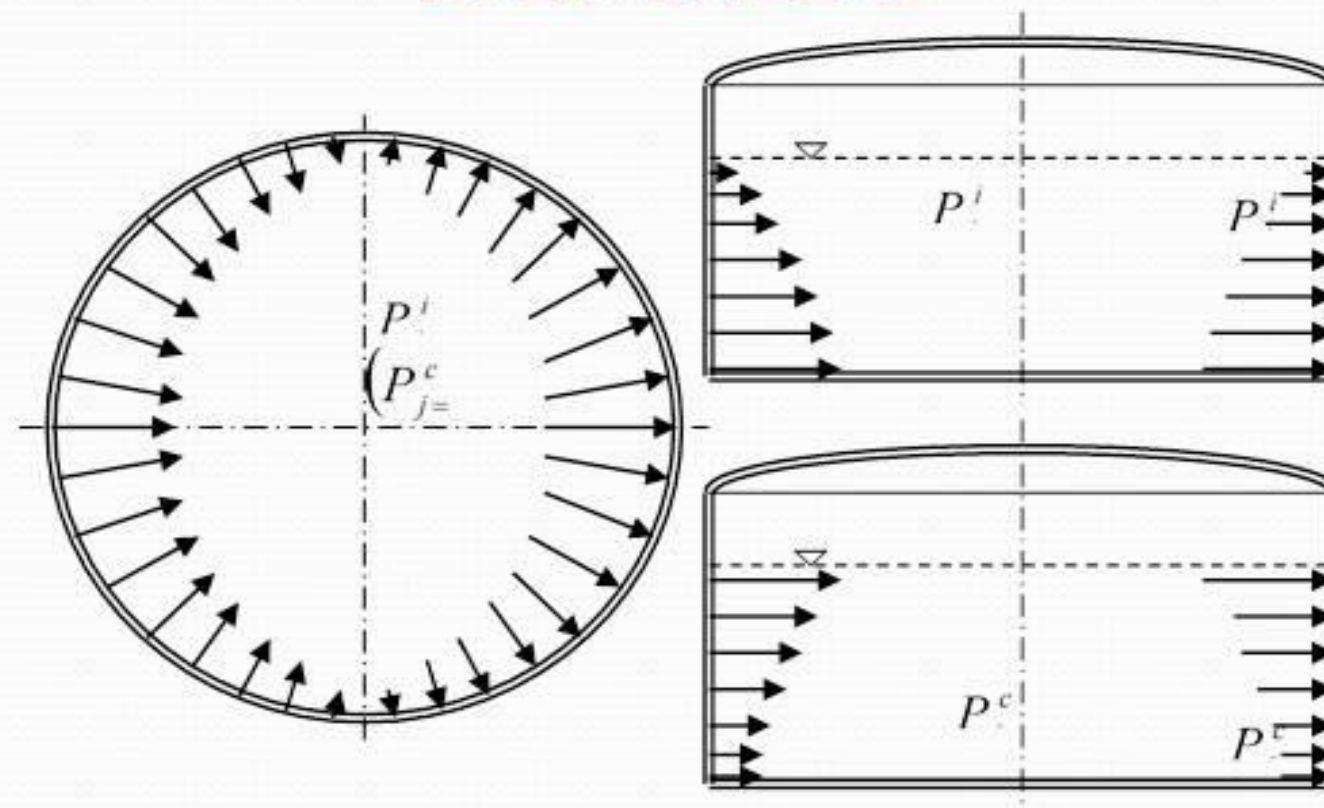


Рисунок 2.8 – Вплив гідродинамічних тисків: а – розподіл тисків у плані на відмітці  $z \leq h_{pu}$ , б – імпульсивний тиск у перерізі  $z=0x$ , в – конвективний тиск у перерізі  $z=0x$ .



## Економічний ефект пропонованого рішення

Для розрахунку економічного ефекту використаємо формулу:  
*Економічний ефект = Зменшення витрат - Вартість ремонту*

Отриманий результат економічного ефекту становить **-2 592 868 грн.** Це означає, що витрати на ремонт резервуару перевищують заощадження, отримані в результаті зменшення витрат на електроенергію, зарплатню та обслуговування. Таким чином, з економічної точки зору, ремонт даного резервуару на даний момент не є доцільним



## ВИСНОВКИ

19

- Під час виконання наукової роботи було **розроблено методику аналізу напружено-деформованого стану великорозмірних резервуарів** для раціонального проектування на реальному прикладі, яка полягає у аналізі внутрішніх напружень у елементах бічної стінки резервуарів від різних варіантів навантажень та порівнянні їх екстремальних значень з допустимими величинами, визначеними згідно з чинною нормативною документацією.
- На основі розроблених моделей напружено-деформованого стану з урахуванням дефектів і пошкоджень конструкцій запропоновано метод, який дозволяє оцінити граничну висоту і, відповідно, граничну місткість існуючих резервуарів, для довільного корисного продукту без підсилення основних несучих елементів, що дозволяє без значних капітальних вкладень експлуатувати споруду за призначенням. Метод полягає у знаходженні максимального рівня наповненості резервуару, при якому всі умови граничних станів першої та другої груп, з урахуванням аварійних станів при сейсміці, виконувалися б повністю.
- Базуючись на сучасних досягненнях науки і техніки в Україні та за кордоном, розроблено модель поведінки реологічного-середовища (рідкого продукту) всередині ємності під дією сейсмічних впливів, шляхом заміни середовища імпульсивною та конвективною масами. Оцінено силовий інерційний вплив на стінки резервуарів від рідкого продукту за розробленою моделлю.
- Запропоновано методику оцінки збуреної сейсмічними впливами хвилі на поверхні резервуару, що дозволяє у подальшому, виключити понаднормативних впливів на кришку великорозмірних резервуарів будь-якої місткості та форми.
- Важливим висновком щодо аналізу стану існуючих нормативних джерел з проектування резервуарів є те, що надійна методика моделювання сейсмічних впливів на резервуари в вітчизняних нормах, відсутня. Проектувальникам пропонується використовувати методику запропоновану колективом авторів В.О. Поповим, О.В. Войцехівським, І.Р. Сазоною та Д.М. Байдою
- Результати дослідження можуть бути використані в інженерній практиці при проектуванні та будівництві великорозмірних сталевих циліндричних резервуарів для зберігання неагресивних рідин. Отримані результати досліджень можуть допомогти інженерам та конструкторам визначити оптимальні розміри та параметри сталевих циліндричних резервуарів, що забезпечать їх ефективну роботу та безпеку під час експлуатації. Таким чином, науково-технічні дослідження в галузі механіки матеріалів мають велике значення для практичного застосування в інженерній практиці та будівництві.



**ВІДГУК**  
**керівника магістерської кваліфікаційної роботи**

студента (ки) \_\_\_\_\_ Криклива Катерина Павлівна  
(прізвище, ім'я, по батькові)

на тему Великорозмірні сталеві циліндричні резервуари для зберігання неагресивних рідин

Магістерська кваліфікаційна робота присвячена дослідженню напружено-деформованого стану існуючих великорозмірних резервуарів, під дією комплексу кліматичних та технологічних впливів, відповідає завданню. Актуальність магістерської роботи обґрунтовується необхідністю подальшого безпечного використання за призначенням фонду сталевих резервуарів, збудованих у в минулому, які, через скрутний економічний стан нашої держави, особливо в умовах воєнних дій, важко замінити на нові, більш сучасні та надійні споруди.

В роботі проведено ґрунтовний науковий узагальнюючий аналіз конструктивних рішень та технічних станів існуючих конструкцій резервуарів, виготовлених з металу, переваги та недоліки цих споруд над іншими ємнісними спорудами на основі опрацьованих наукових та нормативних джерел. Описано принципове рішення та функції конструктивних елементів сучасного типового вертикального циліндричного резервуару. Базуючись на нормативних методиках виконано аналітичне моделювання напружено-деформований стан бічних стінок споруди та функціональні залежності, які дозволяють оцінити величини внутрішніх напружень. На конкретному прикладі резервуару, збудованого на одному з хімічних підприємств України, яке знаходиться у сейсмонебезпечній зоні, виконане уточнене скінчено-елементне моделювання роботи споруди під навантаженням з урахуванням накопичених протягом тривалої експлуатації дефектів та пошкоджень. Для цього запропоновано методику моделювання інерційних силових впливів від корисного рідкого продукту всередині резервуару та висоту збудженої хвилі, яка може виникати при сейсмічному струсі.

Магістранткою виявлено, що найбільш небезпечним з точки зору міцності резервуару є стан вакууму, який може виникати при випуску продукту. Автором зроблено висновок, що через погану здатність опиратися вакуумному розрідженню та сейсмічним впливам, існуючі методи підсилення тонкостінних металевих резервуарів, наприклад, улаштуванням обрамлюючих кілець жорсткості, не ефективні. Тому доцільно продовжувати експлуатувати резервуари знизивши їх корисну місткість до 60-70% від проектної.

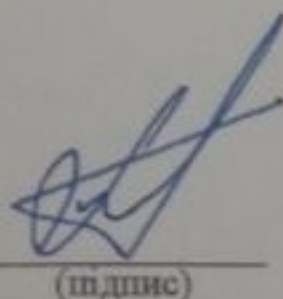
Проведені автором магістерської роботи наукові дослідження виконувалися самостійно на високому рівні. Магістрантка ерудована, володіє матеріалом із раціонального проектування резервуарів, вміє аналізувати та узагальнювати науковий матеріал. Як наслідок, за матеріалом магістерської кваліфікаційної роботи опубліковано дві наукових публікації, одна з яких у фаховому виданні. Основні результати роботи доповідалися на ЛП науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету.

Дослідження, виконані автором, виконувалися вчасно, у відповідності до затвердженого календарного плану. Магістрантка за рівнем підготовки відповідає вимогам освітньої програми за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія та заслуговує оцінки «А» (відмінно) та присвоєння їй ступеня магістра будівництва.

**Керівник магістерської кваліфікаційної роботи**

Доц. каф. БМГА, к.т.н

(посада, науковий ступінь, вчене звання)



(підпис)

Попов В.О.

(ініціали, прізвище)



## ВІДГУК ОПОНЕНТА

на магістерську кваліфікаційну роботу

студента Крикливої Катерини Павлівни

на тему «Великорозмірні сталеві циліндричні резервуари для зберігання неагресивних рідин»

Магістерська кваліфікаційна робота Крикливої К.П. відповідає темі і індивідуальному завданню. Тема даної роботи актуальна, тому що присвячена розробці методів оцінки стану великорозмірних резервуарів в промисловості, енергетиці, сільському господарстві.

Робота виконана за науковою тематикою кафедри БМГА, об'єкт і тема МКР є реальними. Матеріали роботи пройшли апробацію на конференції та опубліковані у фаховому виданні. Робота складається з вступу, 4 розділів та висновків. У вступі наведена актуальність, мета і завдання МКР, новизна, практичне значення, апробації та публікації за темою МКР. У першому розділі виконаний аналітичний огляд літературної та патентної інформації з питань сучасного стану теорії та практики проектування сталевих циліндричних резервуарів. У другому розділі розроблена математична модель напружено-деформованого стану циліндричного резервуару та проведені дослідження впливу кліматичних, технологічних та сейсмічних навантажень. В третьому розділі наведені конструктивні пропозиції по підсиленню існуючих резервуарів та технологія ремонтних робіт. Четвертий розділ присвячений визначенню кошторисної вартості виконання ремонтних робіт та показників економічних ефектів виконання ремонту.

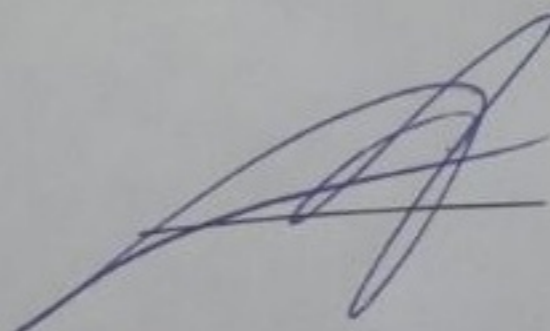
При виконанні роботи враховані сучасні тенденції розвитку теорії та практики проектування циліндричних резервуарів, досягнення науки і техніки в сфері напружено-деформованого стану складних просторових систем, робота має обґрунтовальний характер, оформлення пояснювальної записки та графічної частини відповідає вимогам стандартів. Отримані результати можуть бути впроваджені на практиці.

Недоліком роботи є недостатнє пояснення впливу реологічних властивостей рідин на проектування циліндричних резервуарів для їх зберігання.

Не дивлячись на недоліки робота відповідає вимогам до магістерських кваліфікаційних робіт, при відповідному захисті може бути оцінена на 90 А, а студентка Криклива К.П. заслуговує присвоєння їй ступеня магістра та кваліфікації «магістр будівництва».

**Опонент**

В.о. завідувача кафедри ТЕ, к.т.н.



Дмитро СТЕПАНОВ