

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет інженерії машин, споруд і технологій
(повна назва факультету)
Будівельної механіки
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

Магістра

(назва освітнього ступеня)

на тему: Дослідження циліндричних резервуарів при дії сейсмічних впливів

Виконав(ла): студент(ка) 6 курсу, групи МБнм-61
спеціальності _____

192 «Будівництво та цивільна інженерія»

(шифр і назва спеціальності)

_____ Лановий А.Р.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник _____ Пиндус Ю.І.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Нормоконтроль _____ Данильченко С.М.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри _____ Ковальчук Я.О.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Рецензент _____ Бобик М.П.
(підпис) (прізвище та ініціали)

Тернопіль
2020

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет Факультет інженерії машин, споруд і технологій
(повна назва факультету)

Кафедра Будівельної механіки
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис) _____
(прізвище та ініціали)
« » 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня Магістр
(назва освітнього ступеня)

за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія
(шифр і назва спеціальності)

студенту Лановому Андрію Романовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження циліндричних резервуарів при дії сейсмічних впливів»

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

Затверджені наказом ректора від «__» _____ 20__ року № _____

2. Термін подання студентом завершеної роботи _____

3. Вихідні дані до роботи _____

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

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

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці			
Безпека в надзвичайних ситуаціях			
Нормоконтроль			

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка

Студент

(підпис)

Лановий Андрій Романович

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Пиндус Юрій Іванович

(прізвище та ініціали)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАЛЕВІ ЦИЛІНДРИЧНІ РЕЗЕРВУАРИ	8
1.1 Класифікація та основні типи резервуарів	8
1.2 Статичні розрахунки вертикальних циліндричних резервуарів	11
1.3 Пошкодження вертикальних циліндричних сталевих резервуарів, що виникли в результаті сильних землетрусів	17
1.4 Висновок до розділу 1.....	26
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ СТАЛЕВИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ РЕЗЕРВУАРІВ	28
2.1 Розгляд існуючих підходів до розрахунку сталевих вертикальних циліндричних резервуарів при сейсмічному впливі.....	28
2.1.1 Методика G. W. Housner.....	28
2.1.2 Методика Н. А. Ніколаєнко	32
2.1.3 Методика Велетсоса.....	35
2.2 Чисельний аналіз результатів	36
2.3 Розрахунок міцності корпусу вертикального сталевого циліндричного резервуара на гідродинамічне навантаження при горизонтальному сейсмічному впливі.....	37
2.4 Висновки до розділу 2	46
РОЗДІЛ 3 РОЗРАХУНОК ВЕРТИКАЛЬНОГО СТАЛЕВОГО ЦИЛІНДРИЧНОГО РЕЗЕРВУАРА НА СЕЙСМІЧНИЙ ВПЛИВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПК LIRA	47
3.1 Дані для розрахунку.....	47
3.2 НДС в елементах сталевого циліндричного резервуара при дії сейсмічного впливу	48
3.2.1 Результати напружень і переміщень для першої форми коливань.....	48

3.2.2	Результати напружень і переміщень для другої форми коливань	54
3.3	Висновки до розділу 3	59
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ		60
4.1	Характеристика об'єкту з точки зору охорони праці	60
4.2	Безпека в надзвичайних ситуаціях	61
4.2.1	Оцінка стійкості об'єкта будівництва від надзвичайних ситуацій природнього характеру	61
4.2.2	Коротка характеристика впливу надзвичайних ситуацій природнього характеру	62
4.2.3	Заходи при землетрусі	63
4.2.4	Заходи щодо підвищення стійкості об'єкта	64
4.2.5	Системи сейсмосахисту будівель і споруд	65
ВИСНОВКИ.....		66
БІБЛІОГРАФІЯ.....		67

ВСТУП

Актуальність теми. Проблема забезпечення міцності циліндричних резервуарів для зберігання нафтопродуктів має важливе значення і є досить актуальною для України. Територія України віднесена до сейсмічних районів і тут прогноуються землетруси інтенсивністю 7-8 балів.

У зв'язку з цим проблема експлуатаційної надійності та забезпечення міцності резервуарів при сейсмічних впливах має високу актуальність і одне з найважливіших завдань наукових досліджень в Україні.

Вертикальні сталеві циліндричні резервуари (РВС), завдяки своїй простоті і ряду переваг в порівнянні з іншими конструктивними формами, на даний час є найбільш прогресивною конструкцією сховищ для рідин, які найбільш часто застосовуються в сейсмічно небезпечних районах. Сталеві вертикальні циліндричні резервуари, як показує аналіз наслідків сильних землетрусів, виявляються досить чутливими до сейсмічних впливів, пошкоджуються і руйнуються, приводячи до досить значного збитку, заподіяного народному господарству. Якщо рідина, що зберігається в резервуарі, є горючою або високотоксичною, то поєднання цих факторів неминуче призводить до катастрофічних наслідків або екологічних лих.

Доцільність проведення досліджень зумовлена тим, що отримані результати дадуть можливість забезпечити надійність та довговічність сталевих циліндричних резервуарів впродовж їх експлуатації при дії сейсмічних навантажень.

Метою роботи є визначення за допомогою методу скінченних елементів НДС наповненого вертикального сталевого циліндричного резервуару при дії сейсмічних навантажень.

Завданнями дослідження є:

- розглянути класифікацію та основну типізацію вертикальних сталевих циліндричних резервуарів;

- виявити основні вимоги до статичних розрахунків наповнених вертикальних сталевих циліндричних резервуарів;
- провести аналіз основних пошкоджень наповнених вертикальних сталевих циліндричних резервуарів, що виникають внаслідок дії сейсміки;
- розглянути існуючі аналітичні підходи для визначення НДС наповнених вертикальних сталевих циліндричних резервуарів при дії сейсміки;
- провести чисельний аналіз результатів розрахунку параметрів НДС наповнених вертикальних сталевих циліндричних резервуарів при дії сейсміки;
- розробити скінченно-елементну модель наповненого вертикального сталевих циліндричного резервуару;
- за допомогою методу скінченних елементів провести розрахунок наповненого вертикального сталевих циліндричного резервуару на дію сейсмічних навантажень;
- на підставі аналізу НДС дати характеристику величині напружень та деформацій наповненого вертикального сталевих циліндричного резервуару при дії сейсмічних навантажень.

Галуззю застосування результатів роботи є проектування, виготовлення, експлуатація та відновлення пошкоджених вертикальних сталевих резервуарів.

Об'єктом дослідження є вертикальний наповнений сталевий резервуар при дії сейсмічних навантажень.

Предметом дослідження НДС наповненого вертикального сталевих резервуару при дії сейсмічних навантажень.

Методами дослідження є метод скінченних елементів реалізований за допомогою програмного комплексу ЛІРА.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що отримала подальший розвиток методика комп'ютерного моделювання для визначення НДС наповненого вертикального сталевих резервуару при дії сейсмічних навантажень з використанням ПК ЛІРА.

Практичне значення отриманих результатів Отримані в роботі результати досліджень можуть бути використані для вдосконалення та оптимізації конструкції

наповнених вертикальних сталевих резервуарів при дії сейсмічних навантажень, а також в лекційних і практичних курсах.

Апробація результатів магістерської роботи виконана на VIII міжнародній науково-технічній конференції молодих учених та студентів (Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 27-28 листопада 2019 р.) та на III Міжнародній студентській науково-технічній конференції "Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання" (Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 23-24 квітня 2020 р.)

Публікація результатів магістерської роботи здійснена у збірниках тез вищезазначених конференцій.

Робота виконана згідно з тематикою науково-дослідних робіт кафедри будівельної механіки ТНТУ та державними програмами надійності і економічності будівельних виробів, матеріалів і конструкцій.

Ключові слова: сталевий резервуар, метод скінченних елементів.

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАЛЕВІ ЦИЛІНДРИЧНІ РЕЗЕРВУАРИ

1.1 Класифікація та основні типи резервуарів

Резервуар – спеціальна ємність для зберігання, транспортування, відпуску та обліку газоподібних і рідких середовищ при різних кліматичних умовах і в зонах з сейсмічною активністю [1]. Виготовляються резервуари з наступних матеріалів:

- сталь;
- алюміній;
- синтетичні матеріали;
- залізобетон та інші.

За формою резервуари поділяються на:

- вертикальні;
- горизонтальні;
- ізотермічні;
- сферичні;
- прямокутні.

Резервуари у вертикальному виконанні циліндричної форми можуть мати [2]:

- плаваючий дах (місткість 120000 куб метрів);
- стаціонарний дах з понтоном (місткістю не повинен перевищувати 50000 м³);
- стаціонарний конічний (обсяг не повинен перевищувати: при зберіганні горючих речовин 50000 м і при зберіганні для легкозаймистих речовин (наприклад, бензин) - 20000 м).
- За способом встановлення резервуари класифікуються на:
 - підземні;
 - наземні;

– надземні.

Найбільшого поширення на промислових підприємствах отримали вертикальні циліндричні резервуари, виготовлені зі сталі.

Вибір типу резервуарів [15,16,17]

Вибір типу резервуарів залежить від властивостей збереженої рідини, оборотності продукту і кліматичних умов району будівництва. Більшість вертикальних циліндричних резервуарів призначено для зберігання нафти і нафтопродуктів [3].

Для зберігання світлих нафтопродуктів, наприклад, гасу і мазути з низькою пружністю парів використовуються звичайні вертикальні циліндричні резервуари низького тиску зі стаціонарним дахом (з надлишковим тиском до 2 кПа і вакуумом до 0,25 кПа) [14]. Сирі нафтопродукти і бензини з високою пружністю парів зберігають у вертикальних циліндричних резервуарах з понтонами (рис. 1.1) або плаваючими дахами (рис. 1.2) або в резервуарах підвищеного тиску (до 70 кПа). Нафтопродукти і зріджені гази зберігають у вертикальних циліндричних або сферичних ізотермічних резервуарах при негативних температурах або в горизонтальних циліндричних і сферичних резервуарах під високим внутрішнім тиском (до 1800 кПа) [15].

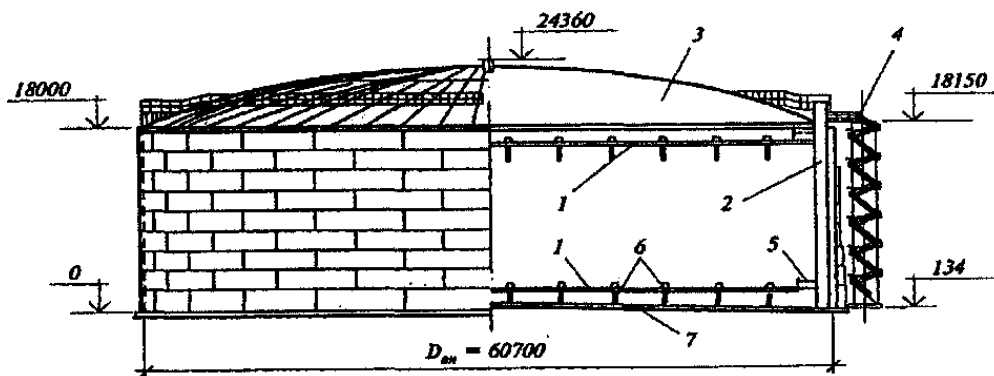


Рисунок 1.1 – Вертикальний циліндричний резервуар об'ємом 50 тис. м з понтоном: 1-понтон; 2-направляюча труба понтона; 3-сферичний дах; 4-шахтні сходи; 5-закриті відсіки понтона; 6-стійки понтона; 7-днище.

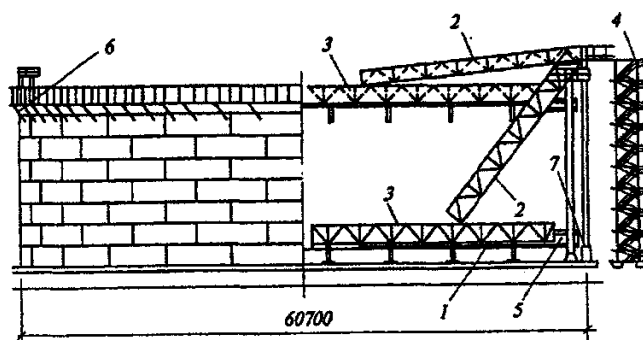


Рисунок 1.2 – Вертикальний циліндричний резервуар об'ємом 50 тис. м з плаваючою дахом: 1 – плаваючий дах; 2 – сходи; 3 – рейковий шлях; 4 – шахтні сходи; 5 – закриті коробки; 6 – кільце жорсткості; 7 – зазор між стінкою резервуара і понтоном

Горизонтальні циліндричні резервуари

Горизонтальні циліндричні резервуари раціонально застосовувати для зберігання невеликих обсягів рідин при порівняно високому і надлишковому тиску (рис. 1.3). Нафтопродукти зберігають під тиском 40 - 70 кПа, а зріджені гази - під тиском до 2000 кПа. У них можливий вакуум до 100 кПа.

Переваги горизонтальних циліндричних резервуарів перед іншими типами резервуарів полягають в можливості майже повного усунення втрат легко випаровуючих рідин при зберіганні під високим внутрішнім тиском, а також в їх потоковому виготовленні на спеціалізованих заводах, доставці в готовому вигляді на будівельний майданчик і швидкості монтажу [13].

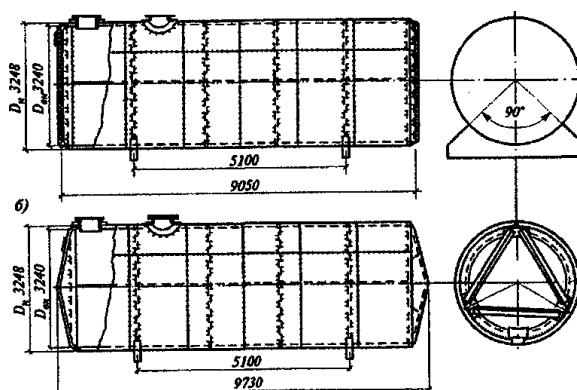


Рисунок 1.3 – Горизонтальний циліндричний резервуар об'ємом 75 тис. м³:
а – з плоским днищем; б – з конічним днищем

Сферичні резервуари

Сферичні резервуари економічніші циліндричних, тому вони використовуються для зберігання рідин і зріджених газів під високим надлишковим внутрішнім тиском від 250 до 1800 кПа. Сферичні резервуари також можуть служити технологічними апаратами в деяких виробництвах.

Резервуар являє собою сферичну оболонку, встановлену на сталевих опорах (рис. 1.4). Об'єм резервуарів зазвичай не перевищує 4000 м³. Найчастіше використовуються резервуари об'ємом 600 і 2000 м³ мають діаметр відповідно 10,5 і 16 м [13].

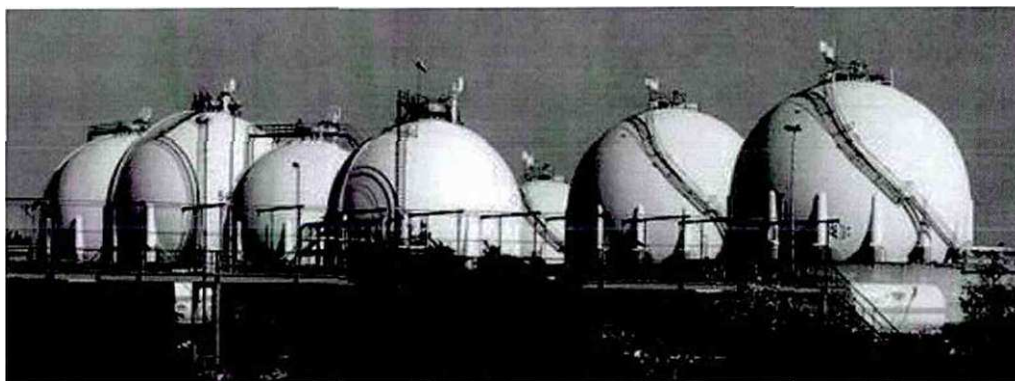


Рисунок 1.4 – Сферичні резервуари

1.2 Статичні розрахунки вертикальних циліндричних резервуарів

Несучі елементи сталевих конструкцій резервуарів розраховують за граничними станами відповідно до будівельних норм і правил (ДБН В.2.6-198:2014 «Сталеві конструкції. Норми проектування» і ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи: Норми проектування.). Нормативні навантаження, що діють на конструкції резервуарів, а також коефіцієнти надійності по навантаженню приймаються відповідно до ДБН В.1.2-2:2006.

Розрахунок стінки резервуарів на міцність [5]. На висоті l від днища на стінку резервуара діє гідростатичний тиск (рис. 1.5):

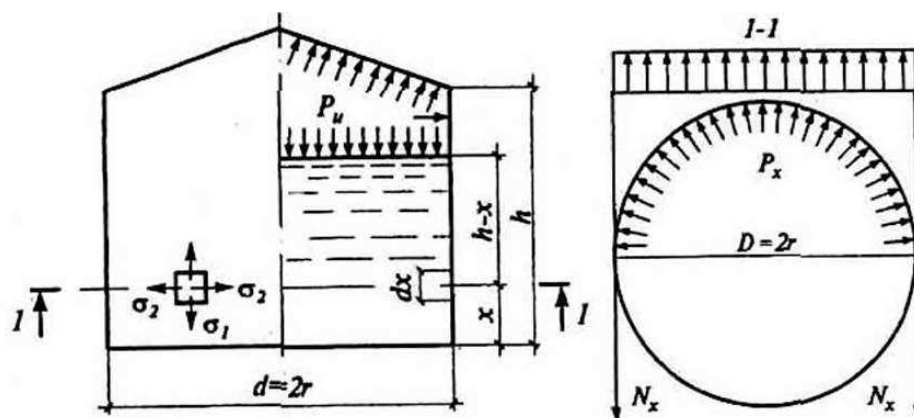


Рисунок 1.5 – Розрахункова схема вертикального циліндричного резервуара

$$P_x = \gamma(h - x)$$

де: γ – густина рідини, h - висота стінки до розрахункового рівня рідини.

Якщо на стінку діє ще надлишковий тиск P_u то повний тиск:

$$P = \gamma(h - x) + P_u$$

При двовісному напруженому стані в оболонці виникають меридіональне зусилля N_1 і кільцеве зусилля N_2 , пов'язані між собою співвідношенням:

$$\frac{N_1}{r_1} + \frac{N_2}{r_2} = P$$

де: r_1 і r_2 – радіуси кривизни відповідно в меридіональному і кільцевому перерізі. В циліндричній оболонці $r_1 = \infty$.

$$N_2 = \gamma_c P r_2 = [\gamma_{f1} \gamma (h - x) + \gamma_{f2} P_u] r_2$$

де: γ_c – коефіцієнт умов роботи, γ_{f1} і γ_{f2} - коефіцієнти надійності по навантаженню.

Кільцеве напруження, на рівні x :

$$\sigma_2 = \frac{N_2}{t_{cm}} = \frac{[\gamma_{f1} \gamma (h - x) + \gamma_{f2} P_u] r_2}{t_{cm}}$$

Товщина стінки циліндричного резервуара:

$$t_{cm} \geq \frac{[\gamma_{f1} \gamma (h - x) + \gamma_{f2} P_u] r_2}{\gamma_c R}$$

Прогин стінки (радіальне переміщення):

$$y = \Delta r = \frac{[\gamma(h - x) + P_u]r^2}{Et_{cm}} = \frac{Pr^2}{Et_{cm}} = \frac{P}{K_{cm}}$$

де: K_{cm} – коефіцієнт постелі стінки.

Розрахунок стінки резервуарів на стійкість [4].

Навантаження, що діють на покриття резервуара і на стінку (снігове, вітрове, теплоізоляція, власна вага, надлишковий тиск і вакуум), в різних поєднаннях викликають в стінці осьовий і поперечний стиск, внаслідок чого стінка в деяких випадках може втратити стійкість.

На осьовий стиск стінку розраховують згідно ДБН В.2.6-198:2014. Стійкість стінки перевіряють за формулою:

$$\sigma_1 \leq \gamma_c \sigma_{ск1}$$

де: σ_1 – розрахункове напруження в оболонці, $\sigma_{ск1}$ – критичне напруження, що дорівнює меншому зі значень ΨR_y або cEt/r (тут r - радіус серединної поверхні оболонки, t - товщина оболонки).

Значення коефіцієнтів Ψ при $0 < r/t < 300$ слід визначати за формулою:

$$\Psi = 0,97 = (0,00025 + 0,95 \frac{R_y}{E}) \frac{r}{t}$$

Значення коефіцієнтів c приймаються по таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 Числові значення коефіцієнтів c

r/t	100	200	300	400	600	800	1000	1500	2500
c	0,22	0,18	0,16	0,14	0,11	0,09	0,08	0,07	0,06

Розрахунок на стійкість замкнутої кругової циліндричної оболонки обертання при дії зовнішнього рівномірного тиску P , нормального до бічної поверхні, слід виконувати за формулою:

$$\sigma_2 \leq \gamma_c \sigma_{ск2}$$

де $\sigma_2 = Pr/t$ - розрахункове кільцеве напруження в оболонці; $\sigma_{ск2}$ - критичне напруження, що визначається за формулами: при $0,5 < l/r < 10$, $\sigma_2 = 0,55E(r/$

$l)(t/r)^{3/2}$; при $l/r > 20$, $\sigma_{cs2} = 0,17E(t/r)^2$; при $10 < l/r < 20$ напруження σ_{cs2} слід визначати лінійною інтерполяцією. Тут l - довжина циліндричної оболонки.

Та ж оболонка, але підкріплена кільцевими ребрами, розташованими з кроком $S > 0,5r$ між осями, повинна бути розрахована на стійкість за вище наведеними формулами з підстановкою в них значення S замість l .

Замкнута кругова циліндрична оболонка, схильна до одночасної дії навантажень, що викликають осьовий і поперечний стиск, перевіряється на стійкість за формулою:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{cr1}} + \frac{\sigma_2}{\sigma_{cr2}} = \gamma_c$$

Розрахунок стику стінки резервуарів з днищем [6].

У вертикальному циліндричному резервуарі, заповненому до розрахункового рівня рідиною, що має густину γ , в сполученні стінки з днищем виникають згинальний момент $X_1(M_0)$ і поперечна сила $X_1(Q_0)$. Розрахункова схема сполучення приведена на рис. 1.6

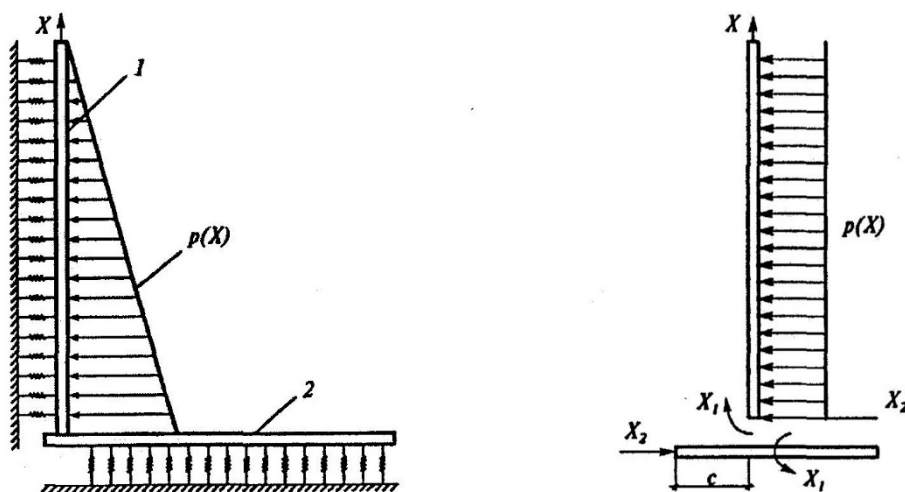


Рисунок 1.6 – Розрахункова схема стику стінки резервуара з днищем. 1- стінка; 2 - днище; X_1 - згинальний момент; X_2 - поперечна сила.

Невідомі X_1 і X_2 визначаються методом сил з рішення канонічного рівняння:

$$\begin{cases} \delta_{11}X_1 + \delta_{12}X_2 + \Delta_{1P} = 0 \\ \delta_{21}X_1 + \delta_{22}X_2 + \Delta_{2P} = 0 \end{cases}$$

де: $\delta_{11}, \delta_{12} = \delta_{21}$ і δ_{22} - одиничні переміщення від $X_1=1$ і $X_2=1$, а Δ_{1P}, Δ_{2P} - вантажні члени, що залежать від зовнішніх навантажень, що впливають на сполучення. Всі перераховані переміщення складаються з двох доданків, що виражають відповідно переміщення стінки і днища:

$$\begin{cases} \delta_{11} = \delta_{11}^{cm} + \delta_{11}^{дн}; & \delta_{11} = \delta_{11}^{cm} + \delta_{11}^{дн} \\ \delta_{22} = \delta_{12}^{cm} + \delta_{22}^{дн}; & \delta_{22} = \delta_{122}^{cm} + \delta_{22}^{дн} \\ \Delta_{1P} = \Delta_{1P}^{cm} + \Delta_{1P}^{дн}; & \Delta_{1P} = \Delta_{1P}^{cm} + \Delta_{1P}^{дн} \end{cases}$$

У розглянутому методі розрахунку прийнято, що днище абсолютно жорстке на розтяг, тобто:

$$\delta_{12}^{дн} = \delta_{21}^{дн} = \delta_{22}^{дн} = \Delta_{2P}^{дн} = 0$$

Тому в розгорнутому вигляді канонічне рівняння має вигляд:

$$\begin{cases} (\delta_{11}^{cm} + \delta_{11}^{дн})X_1 + \delta_{12}^{cm}X_2 + \Delta_{1P}^{cm} + \Delta_{1P}^{дн} = 0 \\ \delta_{21}^{cm}X_1 + \delta_{22}^{cm}X_2 + \Delta_{2P}^{cm} = 0 \end{cases}$$

Одиничні переміщення і вантажні члени мають такі значення:

$$\delta_{11}^{cm} = \frac{1}{m_{cm}D_{cm}}; \quad \delta_{12}^{cm} = \delta_{21}^{cm} = \frac{1}{2m_{cm}^2D_{cm}}; \quad \delta_{22}^{cm} = \frac{1}{2m_{cm}^3D_{cm}};$$

де:

$m_{cm} = \sqrt[4]{k_{cm}4D_{cm}}$ - коефіцієнт деформації стінки;

$k_{cm} = Et_{cm}/r_{cm}^2$ - коефіцієнт постелі стінки;

$D_{cm} = Et_{cm}^3/12(1 - \mu^2)$ - циліндрична жорсткість стінки;

t - товщина стінки;

$\mu = 0,3$ - коефіцієнт Пуассона для сталі;

$E \sim 2,1 \times 10^5$ МПа - модуль пружності сталі.

$$\begin{cases} \Delta_{1P}^{cm} = \frac{\gamma}{k_{cm}}; & \Delta_{2P}^{cm} = \frac{\gamma}{k_{cm}}h_{cm}; \\ \delta_{11}^{дн} = \frac{1}{m_{дн}D_{дн}} \times \frac{1 + \varphi^2 m_{дн}c + 2\theta^2 m_{дн}c}{4} \end{cases}$$

де: $m_{дн} = \sqrt[4]{k_{дн}4D_{дн}}$ - коефіцієнт постелі основи;

$D_{дн} = Et_{дн}^3/12(1 - \mu^2)$, $t_{дн}$ - товщина стінки.

Значення $\xi_{mx} = e^{-mx} \sin mx$; $\psi_{mx} = \theta_{mx} - \xi_{mx}$; $\varphi_{mx} = \theta_{mx} + \xi_{mx}$; $\theta_{mx} = e^{-mx} \cos mx$ наводяться в роботі [6].

При вирішенні канонічних рівнянь необхідно врахувати, що вантажний член $\Delta_{1P}^{\text{дн}}$ включає переміщення днища, що виникають від впливу на нього рівномірно розподіленого гідростатичного тиску рідини q_0 і зосередженого тиску на днище q_1 маси покриття і стінки. Тому:

$$\Delta_{1P}^{\text{дн}} = \Delta_{1q_0}^{\text{дн}} + \Delta_{1q_1}^{\text{дн}}$$

$$\text{де: } \Delta_{1q_0}^{\text{дн}} = -\frac{q_0 m_{\text{дн}}}{2k_{\text{дн}}} (1 - \varphi t_{\text{дн}} c \psi t_{\text{дн}} c + 2\theta t_{\text{дн}} c \xi t_{\text{дн}} c);$$

Рівняння прогинів y , кутів повороту φ , згинальних моментів M і поперечних сил Q в стінці і днищі, починаючи від сполучення по стінці вгору і по днищу вправо, виражаються формулами:

$$\Delta_{1q_0}^{\text{дн}} = \frac{q_0}{2m_{\text{дн}}^2 D_{\text{дн}}} \theta^2 m_{\text{дн}} c$$

$$y_{cm} = \frac{2m_{cm}}{k_{cm}} (Q_0 \theta_{mx} - m_{cm} M_0 \theta_{mx});$$

$$\varphi_{cm} = \frac{2m_{cm}^2}{k_{cm}} (-Q_0 \varphi_{mx} + 2m_{cm} M_0 \varphi_{mx});$$

$$M_{cm} = \frac{1}{m_{cm}} (-Q_0 \xi_{mx} + m_{cm} M_0 \varphi_{mx});$$

$$Q_{cm} = -Q_0 \psi_{mx} - 2m_{cm} M_0 \xi_{mx}$$

Згинальний момент в днищі:

$$M_{\text{дн}} = \frac{M_0}{2} (1 + \varphi^2 m_{\text{дн}} c) - \frac{q_1}{4m_{\text{дн}} c} (1 + 2\theta t_{\text{дн}} c - \psi t_{\text{дн}} c \varphi t_{\text{дн}} c) - \frac{q_0}{2m_{\text{дн}}^2} \xi t_{\text{дн}} c$$

Напруження в самому сполученні від згинального моменту $X_I = M$ визначаються формулами:

$$\sigma_{cm} = \frac{M_{cm}}{\omega_{cm}} \leq \gamma_c R m_{кр}; \quad \sigma_{\text{дн}} = \frac{M_{\text{дн}}}{\omega_{\text{дн}}} \leq \gamma_c R m_{кр}$$

$$\text{де: } \omega_{cm} = \frac{t_{cm}^2}{4}; \quad \omega_{\text{дн}} = \frac{t_{\text{дн}}^2}{4}; \quad m_{кр} = 1,2 \text{ – коефіцієнт умов роботи стінки}$$

резервуара в зоні крайового ефекту, що враховує пластичний момент опору.

1.3 Пошкодження вертикальних циліндричних сталевих резервуарів, що виникли в результаті сильних землетрусів

В результаті узагальнення даних про наслідки землетрусів на резервуари, можна зробити висновок про те, що основними причинами їх аварій при сейсмічних впливах (рис. 1.7) є:

- руйнування плаваючого даху і пошкодження сходів плаваючого даху (рис. 1.7а);
- руйнування стаціонарного даху в результаті удару хвилі рідини, що коливається (рис. 1.7б);
- втрата стійкості верхньої частини корпусу (рис. 1.7в);
- пластичні деформації оболонки резервуара в нижній частині (так звана «слонова ступня») від дії гідродинамічного навантаження (рис. 1.7г);
- утворення вм'ятин в нижній частині корпусу резервуара (рис. 1.7д);
- розгойдування резервуара (рис. 1.7е);
- зсув корпусу резервуара щодо основи (рис. 1.7ж);
- локальні усадки основи під днищем резервуара (рис. 1.7з);
- загальний ухил резервуара (рис. 1.7і);
- перекидання резервуара (рис. 1.7й);
- підйом днища від основи і пошкодження вузлів сполучення корпусу з днищем і зв'язків трубопроводу (рис. 1.7к).

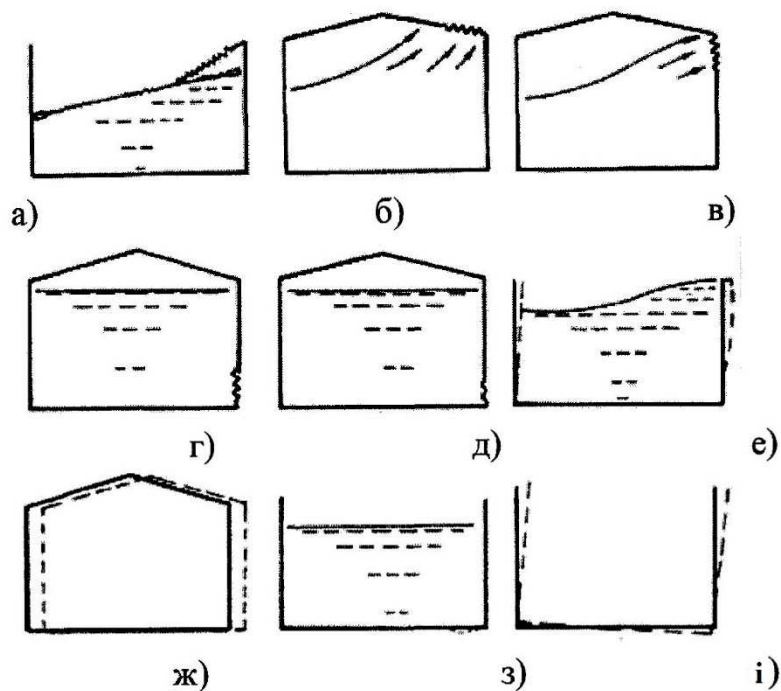


Рисунок 1.7 – Схеми руйнувань вертикальних сталевих циліндричних резервуарів при землетрусі

Можна відзначити, що перераховані вище пошкодження СВЦР в результаті сейсмічного впливу пов'язані з впливом не тільки інерційної сили від власної ваги рідини, резервуара і обладнання, а й, головним чином, впливом рідини що коливається, яка в залежності від рівня заповнення резервуара викликає гідродинамічний удар об дах і корпус резервуара.

Слід зазначити, що необхідність збільшення товщини стінки корпусу СВЦР зазвичай пов'язують з небезпекою крихкого руйнування конструкції, особливо в місцях з'єднання стінки з днищем, що викликає не тільки збільшення витрати сталі але і викликає додаткові труднощі його виготовлення і монтажу.

American lifeline [42, 43] створив збірник корисної інформації в якому зібрані дослідження вразливості, виконаних для 552 типів вивчених резервуарів під дією дванадцяти минулих землетрусів (з 1933 до 2003). В опублікованому звіті були наведені параметри: прискорення ґрунту (PGA), діаметр, висота, відношення висоти до діаметру, рівень заповнення, види і ступеня пошкодження але, на жаль, не містилася детальна інформація щодо коливання землетрусу, якому споруда була

піддана, матеріальні властивості або товщина плити резервуара, або основа проекту, на яку розподілялася плита. З цієї причини неможливо на підставі одного тільки опису пошкоджень зробити детальну оцінку сейсмічного процесу проекту, представленої в цьому розділі.

Кожному резервуару призначили одне з п'яти станів пошкодження від 1 до 5. Якщо у резервуара були множинні пошкодження, йому призначалося найсерйозніший стан пошкодження (5). Стани пошкодження наступні:

- тип пошкодження 1 (DS1) : ніяких пошкоджень;
- тип пошкодження 2 (DS2): невеликі пошкодження – пошкодження даху, незначна втрата вмісту, пошкодження прикладених труб;
- тип пошкодження 3 (DS3): помірне пошкодження – деформація «нога слона» без втрат або незначна втрата вмісту;
- тип пошкодження 4 (DS4): велике пошкодження – деформація «нога слона» зі значною втратою вмісту, серйозні пошкодження;
- тип пошкодження 5 (DS5): повне пошкодження – руйнування конструкції.

Для резервуарів тип пошкодження міг не вимагати серйозних витрат на відновлення, але зробити значний вплив на функціональні можливості, або навпаки. Наприклад, DS=3 в цій класифікації означає, що резервуар переніс деформацію «ноги слона» але є все ще навантажений виток. Щоб відновити цей тип пошкодження, власник міг замінити скріпленій пряжкою нижчий курс раковини з новим нижчим курсом, що економічно складе від 20% до 40% вартості заміни всього резервуара але все ж резервуар не буде втрачати своїх функціональних можливостей після землетрусу. Інший тип пошкодження, DS =2, може призвести до пошкодження прикладеної труби, що спричинить витрати на ремонт всього від 1% до 2% вартості заміни всього резервуара але зробить резервуар повністю придатним до використання негайно після землетрусу. Отримані результати вразливості записані в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 Результати вразливості

Тип пошкодження	Вартість ремонту як відсоток від вартості заміни резервуара	Вплив на функціональні можливості як відсоток від вмісту, втраченого негайно після землетрусу
Деформація «нога слона»	40% до 100%	100%
Деформація «нога слона»	30% до 80%	0%
Втрата стійкості верхньої частини корпусу	10% до 40%	0% до 20%
Часткове руйнування даху	2% до 20%	0% до 10%
Повне руйнування даху	5% до 30%	0% до 20%
Розрив труби переповнення	1% до 5%	50% до 100%
Зрушення дна з підстави	2% до 20%	100%

Як можна бачити з даної таблиці, не існує ніякої прямої залежності між вартістю ремонту і функціональними можливостями резервуара.

У роботах наведені описи характеру руйнувань резервуарів під час землетрусів. Зупинимося на деяких з них [38, 42, 43].

Землетрус в Лонг-Біч 10 березня 1933 р. (штат Каліфорнія, США). Сила землетрусу 6,3 бали. У резервуарних парках м. Домінгос були зруйновані 23 резервуари і виникла пожежа. У м. Вілмінгтоні в резервуарних парках також виникли пожежі. Відзначені численні розриви технологічних трубопроводів, значні викривлення поверхні стінок корпусів, тріщини в зварних з'єднаннях вузлів (Рис. 1.8).

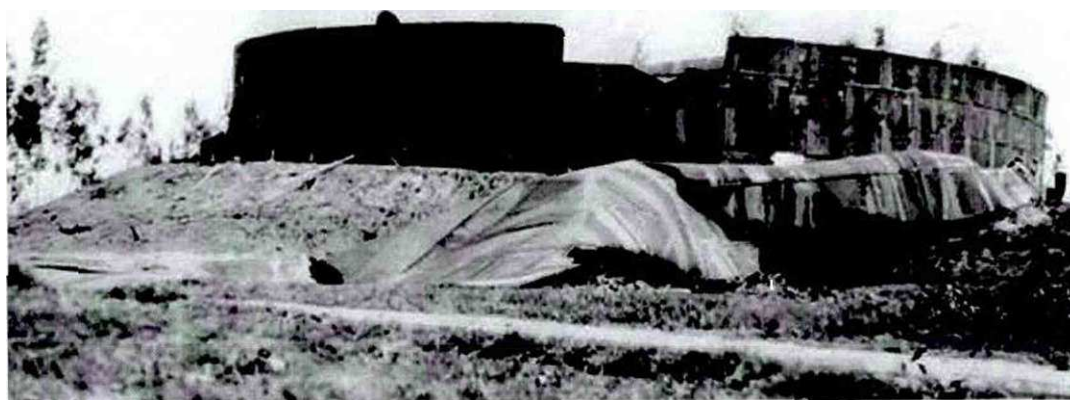


Рисунок 1.8 – Резервуар втратив свій дах і частину верхньої раковини після Каліфорнійського землетрусу, 1933 р., (фотографія: Гарольд м. Енгль)

Землетрус в Керн-Каунті, 1952 р. (штат Каліфорнія, США.). Сила землетрусу 7,7 балів. У резервуарному парку, розташованому в м. Бейкерсфілд з 12 резервуарів тільки 2 витримали підземні поштовхи. Особливо сильно постраждали плаваючі дахи. В результаті пошкоджень резервуарів на нафтоперегінному заводі в м.Палома стався витік бутану, що призвів до його вибуху. Відзначено, що на багатьох резервуарах також сильно постраждали плаваючі дахи (рис . 1.9).



Рисунок 1.9 – Дах зазнав пошкодження, і з'єднання раковини даху просочилося після землетрусу в 1952 р., (Каліфорнійський землетрус, фотографія: К. V. Steinbrugge).

Землетрус в Чилі, 21 травня 1960 року. Інтенсивність землетрусу 7 балів. У м. Хончон в резервуарних парках знаходилося 95 резервуарів, велика частина яких повністю пошкоджена і зруйнувалася.

Аляскінський землетрус, 28 березня 1964 року, сила землетрусу $M = 8,4$. У м. Анкоридж з 21 резервуара тільки один витримав поштовхи. У таблиці 1.4 наведені геометричні характеристики резервуарів і їх експлуатаційний стан перед і після землетрусу.

Таблиця 1.3 Експлуатаційний стан резервуарів перед і після землетрусу

№.	Діаметр м	Висота м	Ємність м ³	Стан перед землетрусом	Характер руйнування
1	9	14,5		Заповнений водою	Зруйнований весь
2	30	9,6	7102	Заповнений нафтопродуктами	Покрівля, низ обичайки, опорні колони
3	13,5	9,6	1430	Заповнений турбінною нафтою	Покрівля, низ обичайки, опорні колони
4	36	9,6	10249	Заповнений нафтопродуктами	Покрівля, низ обичайки, опорні колони
5	36	9,6	10249	Майже порожній	Не пошкоджений
6	36	9,6	10249	Майже порожній	Не пошкоджений
7	27	9,6	5737	Заповнений на 2/3	Плаваючий дах
8	16,5	7	161	Заповнений на 2/3	Повністю зруйнований
9	8	12	697	Повний	Повністю зруйнований
10	33	9,6	8580	Майже порожній	Не пошкоджений
11	9	12	794	Повний	Зрушення дна з основи
12	9	12	794	Повний	Зрушення дна з основи
13	9	12	794	Повний	Зрушення дна з основи
14	12,5	12	1629	Повний	Зрушення дна з основи
15	6	12	354		Зрушення дна з основи
16	43	16,8			Деформації плоского даху через сильний сплеск рідини
17	33,5	16,8			Пошкодження плаваючого даху
18	15	14,4			Зсув дна, підйом резервуара на 25...30 см
19	27	14,4		Заповнений на 3/4	Лопнули зварні шви покрівлі, нижнього поясу обичайки, пошкоджено опорні конструкції покрівлі

У м. Ріттер були 13 резервуарів і всі вони зруйнувалися. У м. Вальдес було 30 резервуарів, з них кілька перекинулося, а частина була повністю знищена в результаті пожежі. У м. Севард також було 30 резервуарів, велика частина яких зруйнувалася, а нафтопродукти вилилися в море (рис. 1.10).

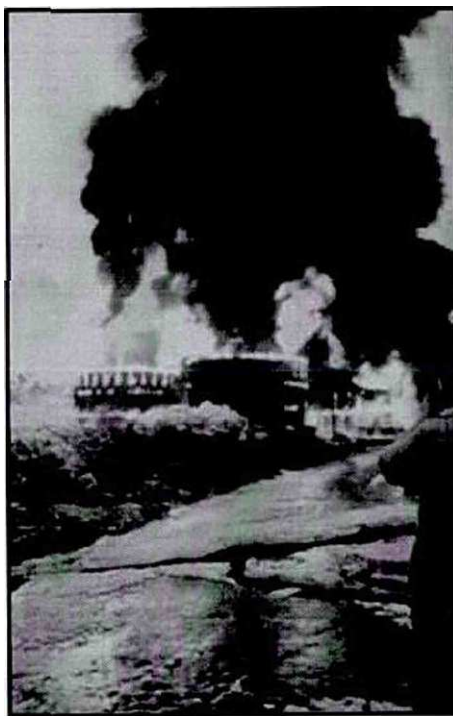


Рисунок 1.10 – Землетрус на Алясці, 28 березня 1964 року

Землетрус 27 лютого 1961 р. (провінція Хюга, західна частина префектури Міядзакі, Японія). Сила землетрусу 7,0 балів. В результаті були майже повністю зруйновані кілька нафтосховищ (рис. 1.11).



Рисунок 1.11 – Землетрус 27 лютого 1961 р. (провінція Хюга, західна частина префектури Міядзакі, Японія)

Землетрус 16 червня 1964 р. (префектура Ніїгата, Міяко, Японія), сила землетрусу 7,5 балів. Були зруйновані кілька нафтосховищ. Відзначено характер пошкоджень: вигин даху, втрата стійкості стінки, руйнування плаваючих дахів, зміщення корпусів резервуарів, локальні осідання основи під резервуарами. На рис. 1.12 показані два резервуара, зруйнованих в результаті землетрусу в Ніїгаті, 1964 року. Хоча даних про рівень заповнення цих резервуарів перед землетрусом немає, можна судити про це за характером пошкодження корпусів.

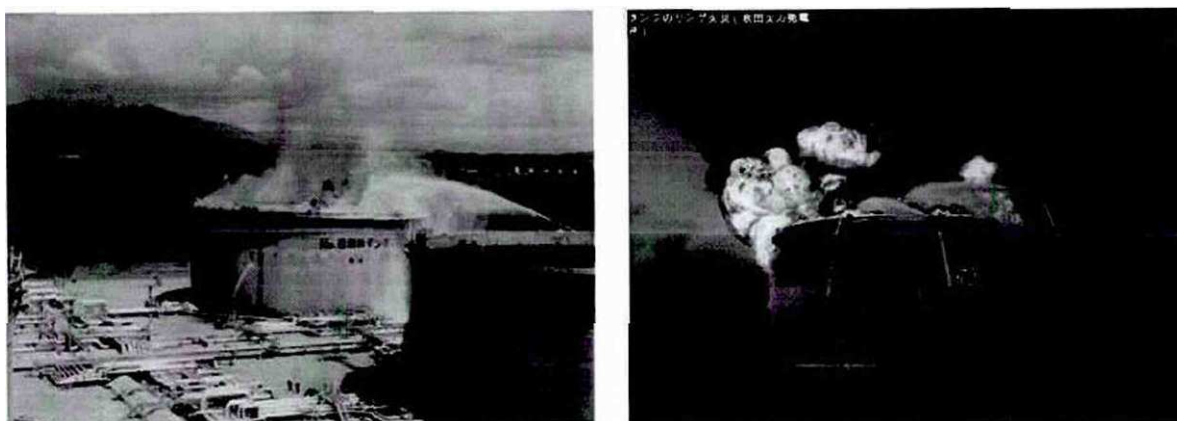


Рисунок 1.12 – Землетрус в Ніїгата, 1964 року

Землетрус в Сан-Фернандо, 1971 р. (штат Каліфорнія, США). Сила землетрусу $M=6,6$. Зруйновано кілька нафтосховищ. Відзначено характер пошкоджень: значні викривлення корпусів в зонах нижніх поясів і в зонах на рівні вільної поверхні рідини, значна кількість тріщин в кільцевих швах (Рис. 1.13).

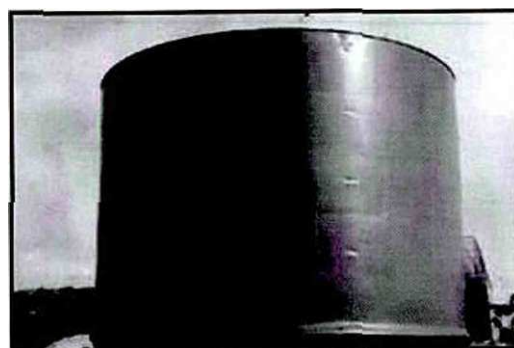


Рисунок 1.13 - «Слонова нога» після землетрусу в Сан-Фернандо, 1971 р., у великому резервуарі для зберігання води.

Землетрус в Манагуа (Нікарагуа) 23 грудня 1972 року. Характер пошкоджень СВЦР-численні вм'ятини в нижніх зонах корпусів.

Землетрус в Перу 10 березня 1974 року. Помічені явища розгойдування резервуарів, утворення численних вм'ятин на вертикальних стінках корпусів.

Землетрус в м. Грінвілл (штат Каліфорнія, США), 24 грудня 1980 р., сила землетрусу 5,5 балів. В результаті землетрусу було пошкоджено близько 100 резервуарів. Основний тип пошкоджень-втрата стійкості стінок в різних місцях, в тому числі в зонах зварних швів.

Землетрус в Туреччині 1999 року. Сила землетрусу 7,0 балів. В результаті були майже повністю зруйновані кілька нафтохранищ (рис. 1.14).



Рисунок 1.14 – Землетрус в Туреччині, 1999 р. (фотографія Gayle Johnson).

Землетрус в Японії, 2003 року. Сила землетрусу $M = 6.8$. В результаті були майже повністю зруйновані кілька нафтохранищ. Відзначено характер пошкоджень: вигин даху, втрата стійкості стінки, руйнування плаваючих дахів, зміщення корпусів резервуарів, локальні опади основи під резервуарами (Рис. 1.15)



Рисунок 1.15 - Землетрус в Японії, 2003 року. Руйнування плаваючих дахів

Чутливість СВЦР до сейсмічних впливів і величезний матеріальний збиток, який наноситься в результаті пошкоджень резервуарів, привели проектувальників до необхідності розробки цілого ряду антисейсмічних заходів, спрямованих на збільшення їх надійності. Основними з них є:

- збільшення товщини першого пояса стінки;
- зміна розмірів резервуара (зменшення величини співвідношення H/D);
- застосування анкерів;
- створення двох і тришарових стінок;
- пристрій конструкцій типу «резервуар в резервуарі»;
- часткове або повне заглиблення корпусу резервуара в ґрунт або воду;
- обмотка рулонової стінки резервуара високоміцної сталевим дротом з попереднім натягом;
- навивка на рулоновану стінку резервуара бандажів зі смуг гарячекатаної сталі в один або кілька шарів.

1.4 Висновок до розділу 1

В першому розділі визначено класифікацію та типізацію основних типів резервуарів. З'ясовано основні особливості статичного розрахунку вертикальних резервуарів. Виявлено основні типи пошкоджень, що виникають в металевих

резервуарах при дії сейсмічних навантажень. Визначено основні типи пошкоджуваностей та базові конструктивні антисейсмічні заходи. Опрацьовано дані по окремих землетрусах, що спричинили значні пошкодження металевих резервуарів.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ СТАЛЕВИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ РЕЗЕРВУАРІВ

2.1 Розгляд існуючих підходів до розрахунку сталевих вертикальних циліндричних резервуарів при сейсмічному впливі

Серйозні дослідження в області сейсмостійкості резервуарних конструкцій проводилися як в нашій країні, так і за кордоном, починаючи з 50-х років двадцятого століття. Завдяки працям М.А.Харон [53], і. І. Гольденבלата [57, 58], Л. Л.Якобсен (Jacobsen, L. L.) [52], П. К. Малхотра [54], А. Н. Ніколаєнко [1], А. С. Велетсос [55, 56], Дж.Хаузнера [50, 44] та ін., в нормативних документах стався перехід від так званої "статичної теорії" до моделей, заснованих на обліку характеру руху ґрунту, інерційних і в'язко-пружних властивостей споруд. Особливості сейсмічних реакцій резервуарів, що містять великі обсяги рідини, детально досліджені в основоположних роботах [42]. Саме стаття [50], а також інші публікації Дж.Хаузера і його послідовників, лягли в основу розрахункових співвідношень, включених у відповідні розділи стандартів API-650, API-620, AWWA D100. На тих же принципах засновані вимоги Eurocode 8 [34], що враховує сучасні тенденції розвитку будівництва в сейсмічно небезпечних районах. Характерною є велика питома вага розділів Eurocode 8, присвячених резервуарам.

2.1.1 Методика G. W. Housner.

У роботах Хаузнера (G. W. Housner) [50] запропонована проста, але ефективна модель недеформованого резервуара з жорстко пов'язаною з його оболонкою приєднаною масою рідини m_1 (що дозволяє врахувати імпульсний гідродинамічний ефект) і з пружно пов'язаної з оболонкою масою поверхневої частини рідини m_2 , що відтворює конвективний (хвильовий) ефект (рис. 1.16).

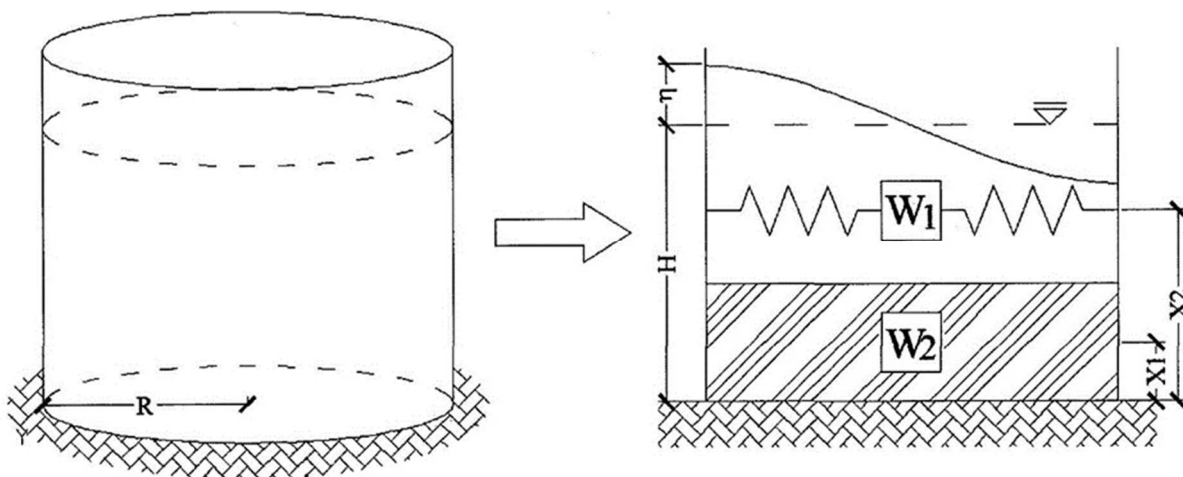


Рисунок 1.16 - Конвективна (W_1) і імпульсивна (W_2) діючі частини рідини на корпус резервуара згідно Д. Хаузнером (модель з одним ступенем свободи)

При $\frac{D}{H} > \frac{3}{4}$ (для короткого резервуара):

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{\operatorname{tgh}\left(\frac{0,866D}{H}\right)}{\frac{0,866D}{H}}; \quad \frac{X_1}{H} = 0,375$$

При $\frac{D}{H} < \frac{3}{4}$ (для високого резервуара):

$$\frac{W_1}{W_2} = 0,5 - 0,094\left(\frac{D}{H}\right); \quad \frac{X_1}{X_2} = 0,5 - 0,094\left(\frac{D}{H}\right)$$

При всіх $\frac{D}{H}$:

$$W_2 = 0,23\left(\frac{D}{H}\right)\operatorname{tgh}\left(\frac{3,67}{\frac{D}{H}}\right); \quad \frac{X_2}{H} = 1 - \frac{\operatorname{ch}\left(\frac{3,67}{\frac{D}{H}}\right) - 1}{\left(\frac{3,67}{\frac{D}{H}}\right)\operatorname{sh}\left(\frac{3,67}{\frac{D}{H}}\right)}$$

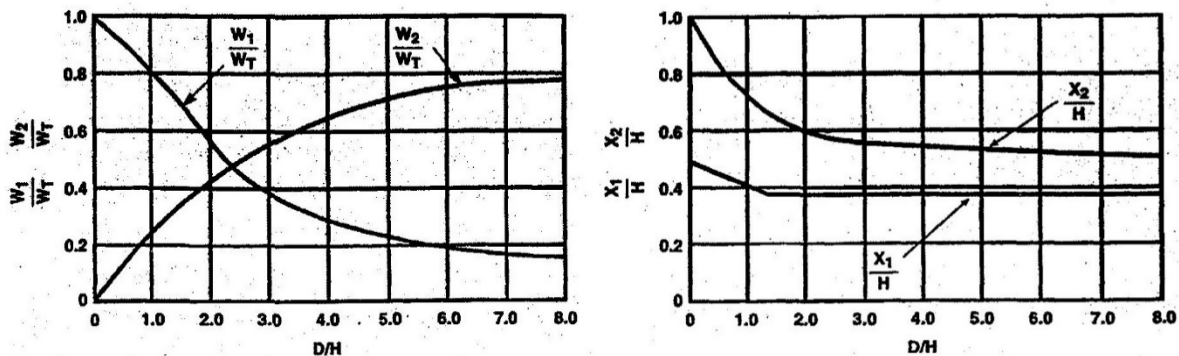


Рисунок 1.17 - Маса і висота середньої точки імпульсивної навпроти конвективної частини рідини в резервуарі

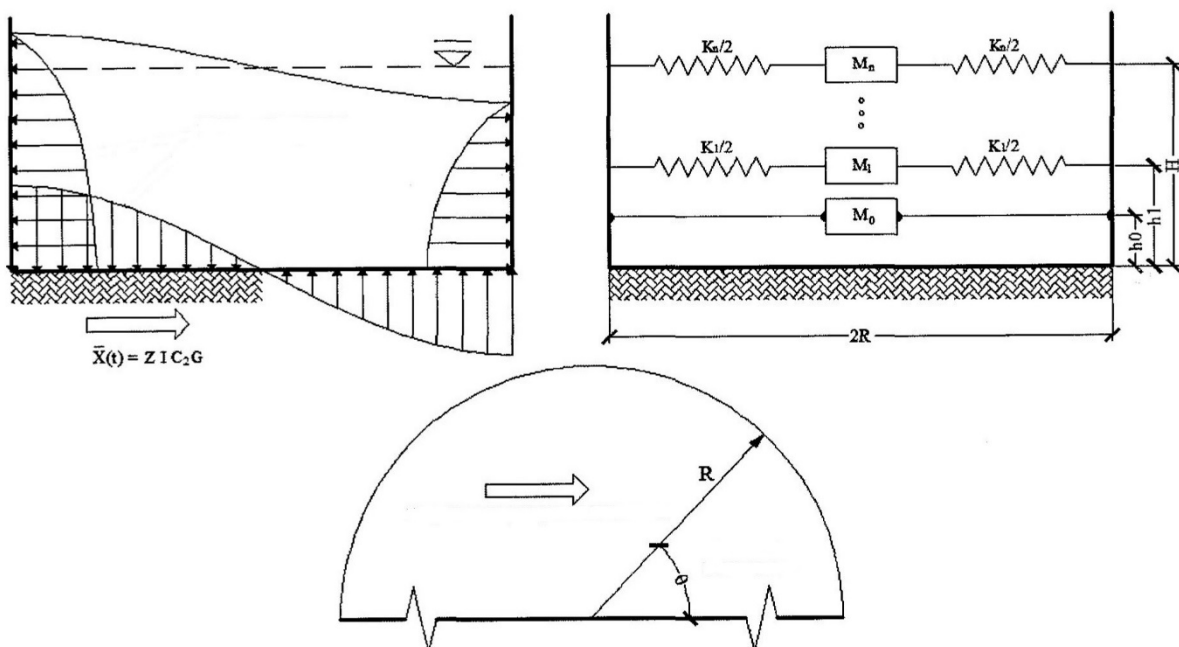


Рисунок 1.18 - Навантаження від продукту, що діють на стінку і днище резервуара

При $\frac{D}{H} > \frac{3}{4}$ (для короткого резервуара):

$$P_1 = 108GZIC_1H \left[\frac{Y}{H} - 0,5 \left(\frac{Y}{H} \right)^2 \right] thg \left(0,866 \frac{D}{H} \right)$$

При $\frac{D}{H} < \frac{3}{4}$ (для високого резервуара):

$$P_1 = 66,4GZIC_1H \left[\frac{Y}{0,15D} - 0,5 \left(\frac{Y}{0,75D} \right)^2 \right]$$

При $Y > \frac{3}{4}D$:

$$P_1 = 33,2GZIC_1D^2$$

При всіх $\frac{D}{H}$:

$$P_1 = 23,4GZIC_1D \frac{ch\left(3,67\frac{H-Y}{D}\right)}{ch\left(3,67\frac{H}{D}\right)}$$

де: P_1, P_2 - імпульсивний і конвективний гідродинамічний тиск рідини на стінку резервуара при землетрусі на будь-якій глибині Y нижче поверхні рідини в напрямку підстави; Z - коефіцієнт сейсмічності, залежний від бальності району; I - коефіцієнт надійності по відповідальності; G - питома вага рідини (для води =1.0); C_1 і C_2 - коефіцієнти сейсмічного розрахунку, визначаються за формулами:

$$C_2 = \begin{cases} \frac{0,75S}{T} & \text{При } T \leq 4,5 \\ \frac{3,375S}{T^2} & \text{При } T > 4,5 \end{cases} \quad \text{і } C_1 = 0,6C_2$$

$$T = \frac{2\pi\sqrt{D}}{3,67g \operatorname{tnh}\left(\frac{3,67}{D/H}\right)}$$

де: T - основний період власних коливань вільного рівня рідини в резервуарі; S - коефіцієнт категорії ґрунту за сейсмічними властивостями. Епюри розподілу конвективного і імпульсивного гідродинамічного тиску рідини на стінки циліндричного резервуара, як показано на рис. 1.19, дають:

$$P_{tot} = P_1 + P_2$$

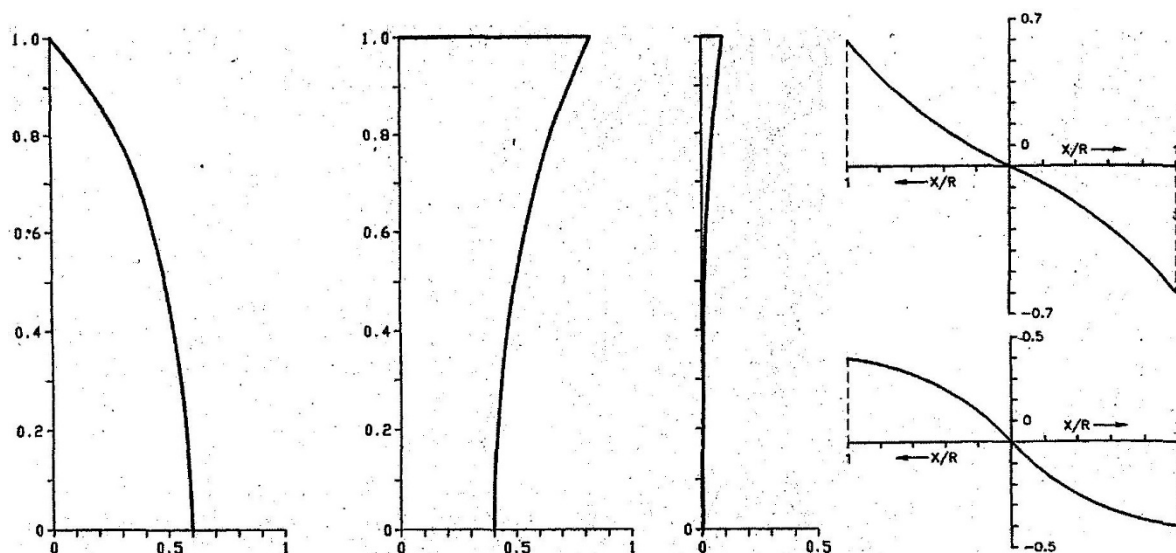


Рисунок 1.19 - Епюри розподілу конвективного і імпульсивного гідродинамічного тиску рідини на стінку і днище резервуара зі значенням $H/R=0.75$

На протилежній стороні тиску негативні або зменшені. Потрібно враховувати, що для дуже коротких резервуарів головний тиск на стінку виникає від конвективного ефекту, а для дуже високих резервуарів - від імпульсивного ефекту.

2.1.2 Методика Н. А. Ніколаєнко

У Росії випромінюванню питань сейсмостійкості в СВЦР присвячені в основному роботи Н.А. Ніколаєнко, і розроблена ним методика розрахунку цих конструкцій викладена в «Рекомендаціях з розрахунку резервуарів і газгольдерів на сейсмічні впливи» [30]. Ця методика розрахунку за визначенням гідродинамічного тиску використана в даній роботі. Отримані формули для розрахунку СВЦР на сейсмічні впливи виведені Н.А. Ніколаєнко при наступних припущеннях:

- резервуар абсолютно жорсткий;
- рідина, що заповнює резервуар, володіє в'язкістю;

- сейсмічний вплив основи є випадковим процесом в часі або імпульсивним;
- розглядається перехідний процес коливання рідини в резервуарі і вважається, що тривалість землетрусу становить 30 сек.

Весь розрахунок резервуара на сейсмічний вплив розбитий на три основні етапи:

1. Визначення висоти хвилі - A_s
2. Визначення гідродинамічного тиску;
3. Знаходження контурного тиску на днище (для розрахунку фундаменту під резервуар).

Для розрахунку висоти хвилі наводиться дві формули в залежності від частоти основного тону рідкого наповнення - W_1 [130]. При $1 \leq W_1 \leq 6$ висота хвилі обчислюється за формулою:

$$A_s = 0,0836 \frac{W_1}{\sqrt{\tilde{v}_1}} RA \sqrt{1 - e^{-60\tilde{v}_1}}$$

де: R – радіус резервуара;

A – коефіцієнт сейсмічності;

\tilde{v}_1 – параметр, що характеризує загасання залежить від ступеня заповнення, радіуса резервуара і коефіцієнта кінематичної в'язкості збереженої рідини.

У всіх інших випадках висота хвилі A_s визначається за такою формулою:

$$A_s = 0,0836 RA \xi_\xi \sqrt{1 - e^{-60\tilde{v}_1}}$$

де: ξ_ξ – коефіцієнт, який залежить від частоти основного тону коливань рідини і параметра \tilde{v}_1 .

Гідродинамічний тиск на стінку резервуара для випадку, коли сейсмічний вплив є випадковим процесом часу, визначається за формулою:

$$\rho_g = \rho RA \xi_\xi \sqrt{1 - e^{-60\tilde{v}_1}} \times \sin\theta$$

де: ρ – щільність зберігаючої рідини;

ξ_ξ – коефіцієнт динамічності, який береться по таблиці [130] в залежності від W_1 і \tilde{v}_1 ступеня заповнення.

Слід сказати, що в цьому випадку гідродинамічний тиск має максимальне значення в зоні вільної поверхні рідини.

В разі, коли сейсмічний вплив є імпульсивним, (це можливо, якщо частота основного тону власних коливань рідини менше частоти зовнішнього впливу) гідродинамічний тиск обчислюється за формулою:

$$\rho = \rho RA \left[1 - 0,836 \frac{ch\left(1,84h_0 \frac{H}{R}\right)}{ch(1,84h_0)} \right]$$

$$\text{де: } h_0 = \frac{H}{R}$$

Наведені вище формули Н.А. Ніколаєнко поширюються тільки на випадок горизонтального тиску резервуара. У роботі [130] наводиться наступна формула для обчислення сейсмічного тиску рідини на стінки резервуара з плаваючим дахом або понтоном при вертикальному поштовху.

$$\rho_{\text{верт}} = 3A\rho_c$$

де: ρ_c – гідростатичний тиск;

$\rho_{\text{верт}}$ – по висоті розподілено також, як і гідростатичний тиск.

У таблиці 1.4 наведені обчислені значення висот хвилі я рідини A_S для різних ВСР при розрахунковій сейсмічності майданчика будівництва, що дорівнює 9 балам. Можна зробити висновок, що залишення зазору між вільною поверхнею рідини і дахом, рівній висоті хвилі, з метою уникнення удару об дах призведе до недовикористання корисного обсягу резервуара на 20-25%.

Таблиця 1.4 Висота хвилі для різних ВСЦР

Ємність резервуара (м ³)	Радіус резервуара (м)	h ₀ =H/R	Частота основного тону – w ₁	$\frac{\sqrt{v}}{R^4\sqrt{R}}$	\tilde{v}_1	$\sqrt{1 - e^{-60\tilde{v}}}$	Висота хвилі - A _s (м)
1000	5,215	2,29	1,86	0,0004	0,0024	0,3673	2,43
5000	10,46	1,42	1,307	0,0002	0,0012	0,2635	3,48
10000	14,25	1,26	1,115	0,00011	0,00066	0,1981	4,095
15000	17,1	1,05	1,006	0,000091	0,00053	0,1771	4,42
20000	19,95	0,897	0,916	0,000075	0,00044	0,1602	6,34

2.1.3 Методика Велетсоса

Вирішення проблеми по Велетсосу можна коротко записати з декількох формул:

$$f^2 = \frac{\int_0^h EJ(z)\Psi(z)dz}{4\pi^2 \int_0^h \mu(z)\Psi^2(z)dz}$$

де: f^2 – приблизно квадрат основної частоти власних коливань наповненого рідиною резервуара.

$$\beta(z) = \frac{4}{\pi} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\delta_i}{2i-1} \varepsilon_i$$

де:

$$\delta_i = \frac{1}{h} \int_0^h \psi(z) \cos \left[\frac{(2i-1)\pi z}{2h} \right] dz;$$

$$\varepsilon_i = \frac{I_l \left[(2i-1) \frac{\pi r}{2h} \right]}{I_l' \left[(2i-1) \frac{\pi r}{2h} \right]}$$

$$m_l = m_{tot} \frac{8h}{\pi^2 r} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(-1)^i}{(2i-1)^2} \delta_i \varepsilon_i$$

$$m_{tot} = \pi r^2 h \rho$$

$$Q_l = \gamma m_l \alpha_{max}(f)$$

$$M_l = \gamma \frac{m_{tot}}{r} \alpha_{max}(f) \int_0^h z \beta(z) dz$$

$$M_l^* = M_t + \frac{\gamma r}{3} m_{tot} \alpha_{max}(f) \beta(0)$$

$$Q_{tot} = \sqrt{Q_l^2 + Q_k^2}, M_{tot} = \sqrt{M_l^2 + M_k^2}, M_{tot}^* = \sqrt{M_l^{*2} + M_k^{*2}}$$

З виразами для конвективної компоненти Q_k, M_k і M_k^* як і для фактора модального впливу у можна ознайомитися в роботі [32]. У формулі (1.38) $I_l x$ — модифікована бesselева функція першого роду; $I_l' x$ — її перша похідна. Тут потрібно згадати про вибір основної консольної форми резервуара, наповненого рідиною, $\Psi(z)$, зазвичай приймають:

$$\Psi(z) = 1 - \cos\left(\frac{\pi z}{2h}\right), \Psi(z) = 1 - \sin\left(\frac{\pi z}{2h}\right)$$

2.2 Чисельний аналіз результатів

Як приклад розрахунку гідродинамічного тиску розглянемо резервуар об'ємом 4500 м^3 з внутрішнім радіусом стінки $a = 20 \text{ м}$, висота наливу рідини в якому $h = 15 \text{ м}$. Густина рідини (Нафта) $\rho = 850 \text{ кг/м}^3$. Матеріал плаваючого даху-сталь: щільність $\rho_1 = 7850 \text{ кг/м}^3$, модуль пружності $E = 2,1 \times 10^{11} \text{ Па}$, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$. Прискорення поступального руху резервуара вздовж осі X (сейсмічне прискорення) $V(t)$ у відповідність з [51] будемо задавати в частках від прискорення вільного падіння g : $V(t) = sg$; де s - коефіцієнт сейсмічного прискорення, залежить від бальності землетрусу. В даному прикладі $s = 0,4$, що відповідає землетрусу в 9 балів. На рис. 2.4 наведені епюри динамічних прогинів плаваючого даху і відповідних їм внутрішніх зусиль і $Q_\xi(\theta = \pi/2$ при горизонтальному сейсмічному впливі в 9 балів у разі утворення жорсткої закладення на контурі плаваючого даху, а також розподілу гідродинамічного тиску по висоті наливу в резервуарі. Наявність плаваючого даху призвело до приросту гідродинамічного тиску на 17%.

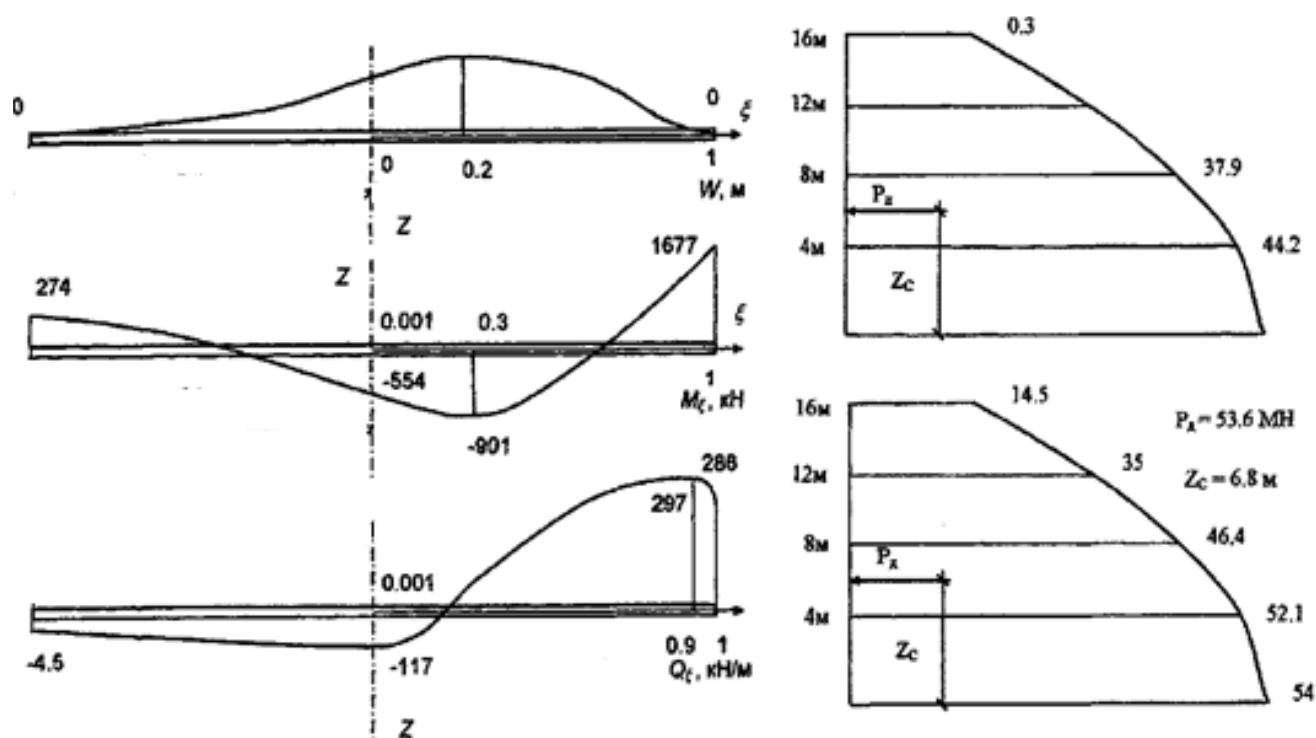


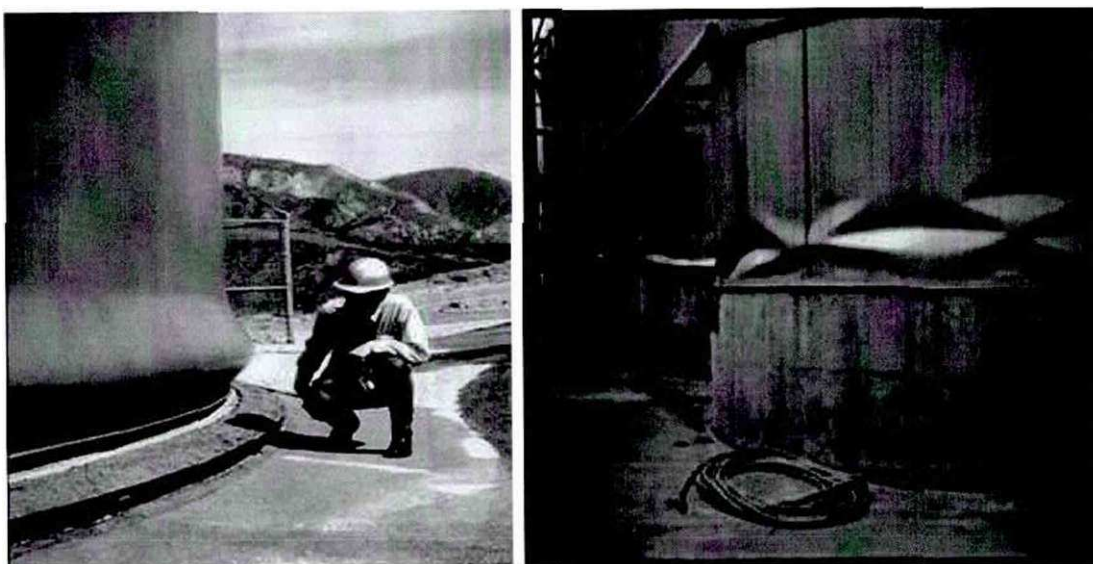
Рисунок 2.4 – Епюри W , M_ξ , Q_ξ жорсткого защемлення контуру пластини і розподілу гідродинамічного тиску по висоті наливу при горизонтальному сейсмічному впливі.

2.3 Розрахунок міцності корпусу вертикального сталевого циліндричного резервуара на гідродинамічне навантаження при горизонтальному сейсмічному впливі

Забезпечення сейсмостійкості резервуарів є комплексною проблемою, що вимагає розробки трьох основних напрямків, що включають визначення гідродинамічних навантажень від рідкого продукту, перевірку корпусу резервуара на перекидання і забезпечення несучої здатності конструкцій в процесі землетрусу. У роботах [40, 41] наведено короткий огляд аналітичних досліджень перших двох завдань та подано уточнені методики відповідних розрахунків.

Особливість роботи резервуара полягає в тому, що при сейсмічному впливі його корпус сприймає не тільки горизонтальні гідростатичні та інерційні

навантаження від рідкого продукту, але і вертикальні реактивні зусилля від фундаменту і покриття, викликані дією перекидаючого моменту. Податливість плоского сталевого днища резервуара призводить до того, що ділянка опорного контуру стінки, розташований з боку дії фронту сейсмічної хвилі, піднімається над фундаментом, в той час як діаметрально протилежну ділянку концентрує і передає на фундамент всі інерційні і статичні навантаження. В результаті деякий сегмент нижнього пояса стінки виявляється в умовах двовісного напруженого стану, викликаного дією кільцевих розтягуючих зусиль від тиску продукту і значних вертикальних стискають зусиль з боку фундаменту. При цьому тонка стінка резервуара може втрачати стійкість за схемою, наведеною на рис. 2.5.



а) нога слона

б) алмазна деформація

Рисунок 2.5 – Пластичні деформації оболонки резервуара в нижній частині (так звана «нога слона»): а – нога слона (для широких резервуарів), б – алмазна деформація (для тонких резервуарів)

Зарубіжні нормативні документи [34, 37] враховують зазначений ефект утворення кільцевої складки і з метою його недопущення вимагають виконання умови:

$$\sigma \leq \sigma_{c0} = \frac{0,2Et}{r}$$

де: σ – вертикальні напруги, що виникають в серединній поверхні нижньої частини корпусу резервуара при землетрусі, σ_{co} – критичні напруги втрати стійкості, E – модуль пружності сталі, r – радіус циліндричної оболонки, t – товщина нижнього пояса стінки, призначена з розрахунку сейсмостійкості резервуара.

Формула (2.29) представляє умову стійкості рівномірно стислій уздовж утворює, Шарнірно опертої по торцях замкнутої циліндричної оболонки. Це співвідношення узгоджується з широко відомими теоретичними та експериментальними результатами роботи [45] для реально можливого параметра тонкостінності вертикальних циліндричних сталевих резервуарів в діапазоні $1000 < r/t < 2000$. Однак, формула (2.29) призначена для визначення критичного навантаження, при якій відбувається розгалуження форм рівноваги оболонки. Насправді, втрата стійкості стінки в процесі землетрусу не супроводжується появою суміжних форм рівноваги, а викликається нелінійним характером розвитку вже наявних деформацій заповненого продуктом резервуара. Характерна форма нижньої ділянки стінки, що втратила стійкість в результаті землетрусу (так звана «слонова нога»), вказує на те, що в зазначеній зоні має місце вичерпання несучої здатності, супроводжуване розвитком значних пластичних деформацій. Таким чином, потрібне дослідження сейсмостійкості стінки з позицій, відмінних від використовуваних в стандартах [34, 37]. Цей розділ присвячений вирішенню цієї проблеми.

Складемо рівняння руху елемента попередньо напруженого кільця з урахуванням всіх внутрішніх зусиль і інерційних членів (рис. 2.6).

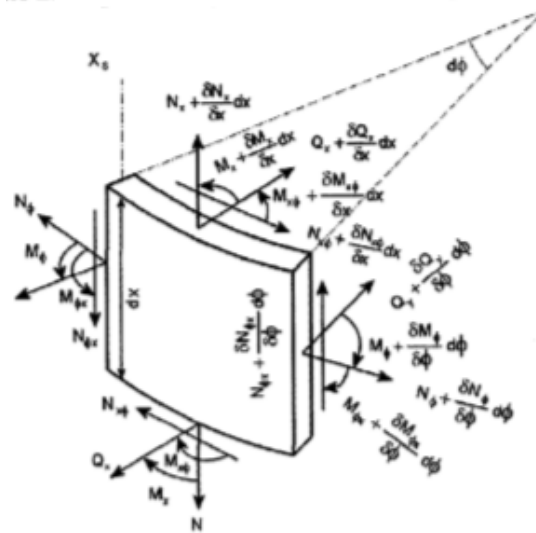


Рисунок 2.6 – Елемент попереднього напруженого кільця

Вважаємо, що напружено-деформований стан нижньої ділянки стінки резервуара описується співвідношеннями геометрично нелінійної теорії тонкостінних циліндричних оболонок в осесиметричній постановці [46];

$$\frac{dQ_x}{dx} + N_x \frac{d^2W}{dx^2} - \frac{1}{r} N_y = -\rho g(H - x)$$

$$N_x = C \left[\frac{du}{dx} + \frac{v}{r} W + \frac{1}{2} \left(\frac{dW}{dx} \right)^2 \right]$$

$$N_y = C \left[v \frac{du}{dx} + \frac{W}{r} + \frac{v}{2} \left(\frac{dW}{dx} \right)^2 \right]$$

$$M_x = -D \frac{d^2W}{dx^2}; \quad Q_x = -D \frac{d^2W}{dx^2}$$

Рівність (2.30) представляє диференціальне рівняння рівноваги елемента в проекції на нормаль до серединної поверхні циліндричної оболонки, а співвідношення (2.31), (2.32) пов'язують переміщення оболонки W , u і її внутрішні зусилля N_x (тангенціальні вертикальні), N_y (тангенціальні кільцеві), M_x (згинальний момент у вертикальній площині), Q_x (перерізуючі сили у вертикальній площині). При цьому w , u – відповідні нормальні і тангенціальні (вертикальні) переміщення корпусу резервуара в перетині, розташованому на відстані x від його днища; H – рівень наливу резервуара; ρ – густина продукту; $\nu = 0,3$ – коефіцієнт Пуассона для

стали; C , D – жорсткісні характеристики циліндричної оболонки, що виражаються рівностями:

$$C = \frac{Et}{(1 - \nu^2)}$$

$$D = \frac{Et^3}{12(1 - \nu^2)}$$

Підстановка залежностей (2.31) в диференціальне рівняння (2.30) з одночасним виключенням членів, що містять похідну du/dx , призводить до наступного співвідношення:

$$\frac{d^4W}{dx^4} + \frac{N_x}{D} \frac{d^2W}{dx^2} + \frac{C}{D} \frac{1 - \nu^2}{r^2} W = \frac{1}{D} \left[\rho g (H - x) + \frac{\nu}{r} N_x \right]$$

де стискаючі зусилля N_x записані зі зворотним знаком, що дозволяє розглядати їх надалі, як позитивні величини.

Аналіз експлуатації резервуарів в сейсмічно небезпечних районах показує, що в разі утворення «слонової ноги», випучування стінки відбувається в області, що має значну протяжність в окружному напрямку і вельми обмежену по висоті ($x < 0.5$ м). Це дозволяє прийняти для подальшого дослідження наступні допущення: розрахунок проводиться в осесиметричній постановці, вертикальна сила стиснення є постійною в розглянутій області стінки, тобто має місце рівність:

$$N_x = const$$

Формування крайових умов проводиться відповідно до конструктивного рішення корпусу резервуара. Нижній контур стінки пов'язаний з вільно лежачим на поверхні основи плоским днищем. Тому у вузлі сполучення стінки з днищем виникає момент і перерізуюча сила, що чинять опір повороту стінки під навантаженням і не допускають радіальне переміщення її нижнього перетину [47]. Очевидно, що використання в розрахунковій моделі шарнірного способу обпирання стінки на фундамент знижує величину критичного навантаження і призводить до більш надійного обчислення. На підставі вищевикладеного приймаємо такі граничні умови:

$$W(0) = 0, M_x(0) = 0 (\text{при } x = 0);$$

$$W(x) < \infty, \frac{dW(x)}{dx} < \infty \text{ (при } x = \infty \text{)}$$

На рис. 2.7 Показані сили і моменти, які діють при даних умовах.

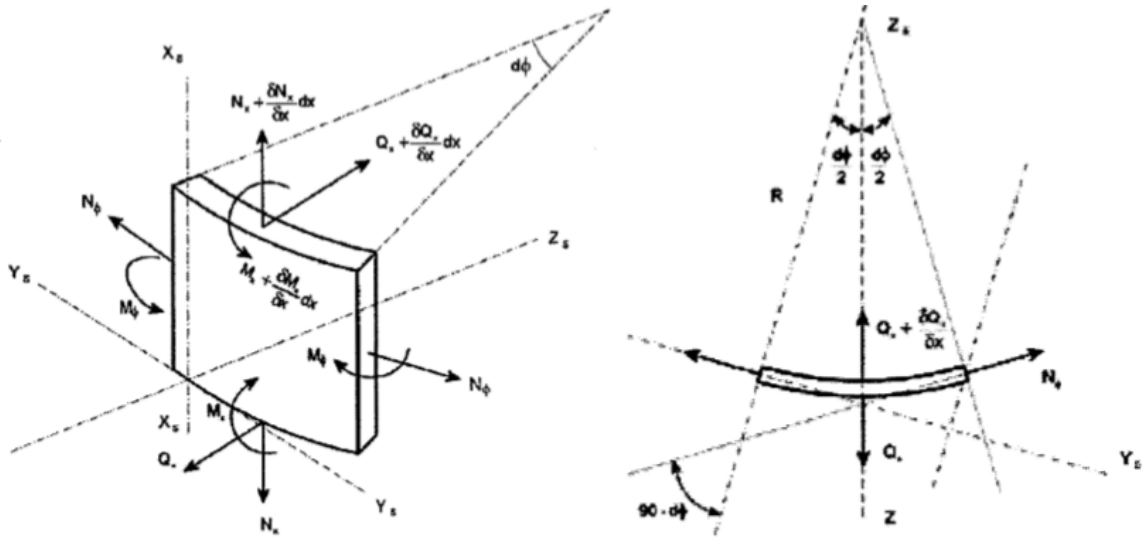


Рисунок 2.7 – Елемент поперечно напруженого кільця на основі граничних умов

Останні дві нерівності (2.36) представляють умови обмеженості рішення при видаленні розрахункового перетину оболонки від днища резервуара. Математичне формулювання задачі, що включає співвідношення (2.34) — (2.36), дозволяє отримати замкнуте рішення для критичного навантаження, маючи при цьому на увазі залежність:

$$y = N_x/t$$

В результаті підстановки інтеграла рівняння (2.34) в граничні умови (2.36), приходимо до наступного виразу для нормальних переміщень оболонки:

$$W = \frac{b^{-4}}{4D} \left\{ \frac{\rho g H + \frac{nt}{r} s}{\exp(\sqrt{b^2 - l^2 x})} \left[\frac{l^2}{\sqrt{b^4 - l^4}} \sin(\sqrt{b^2 + l^2 x}) - \cos(\sqrt{b^2 + l^2 x}) \right] + r g (H - x) + \frac{vt}{r} s \right\}$$

в якому позначено:

$$\lambda^2 = \frac{\sigma t}{4D}, \quad \beta^4 = \frac{\alpha^2}{r^2 t^2}, \quad \alpha^2 = 3(1 - n^2)$$

Уявімо напруження в серединній поверхні оболонки у формі, аналогічній;

$$\sigma = \frac{k Et}{\alpha r}$$

де: k – коефіцієнт, що підлягає визначенню.

В результаті підстановки (2.40) в залежності (2.32), (2.38) маємо:

$$W = \frac{r^2}{Et} \left\{ \frac{\rho g H + \frac{vk Et^2}{\alpha r^2}}{\exp(\sqrt{1 - kbx})} \left[\frac{k \sin(\sqrt{1 + k\beta x})}{\sqrt{1 - k^2}} - \cos(\sqrt{1 + kbx}) \right] + rg(H - x) + \frac{vk Et^2}{\alpha r^2} \right\}$$

$$M_x = \frac{\rho g H + \frac{vk Et^2}{\alpha r^2}}{2\beta^2 \sqrt{1 - k^2}} \frac{\sin(\sqrt{1 + k\beta x})}{\exp(\sqrt{1 - kbx})}$$

Вертикальні фіброві напруження σ_f визначаються співвідношенням:

$$\sigma_f(x) = \sigma + \frac{6M_x(x)}{t^3}$$

дозволяє вирішити задачу на екстремум, тобто визначити координату X_0 - при якій фіброві напруги досягають найбільшого значення σ_{max} . Рішення для X_0 з урахуванням співвідношень (40), (42), призводить до наступного виразу:

$$x_0 = \frac{1}{\beta \sqrt{1 + k}} \arctan \left(\sqrt{\frac{1 + k}{1 - k}} \right)$$

Підстановка залежностей (2.40), (2.42), (2.44) рівність (2.18) дозволяє отримати наступну формулу для максимальних фібрових напружень:

$$\sigma_{max} = \sigma_f(x_0) = \frac{f(k) Et}{\alpha r}$$

де функція $f(k, \mu)$ і безрозмірний параметр μ мають вигляд:

$$f(k, \mu) = k + \left(\mu + \frac{vk}{\alpha} \right) \frac{3}{\sqrt{1-k^2}} \exp \left[-\sqrt{\frac{1+k}{1-k}} \arctan \left(\sqrt{\frac{1+k}{1-k}} \right) \right] \sin \left[\arctan \sqrt{\frac{1+k}{1-k}} \right]$$

$$\mu = \frac{\rho gh}{E} \left(\frac{r}{t} \right)^2$$

Помічаємо, що параметр μ змінюється в діапазоні від 0.3 (резервуари об'ємом менше 1000 м³) до 1.5 (резервуари об'ємом 100000 м³). Для зазначеного діапазону μ функція $f(k, \mu)$ може бути апроксимована залежністю:

$$f(k, \mu) = \frac{0,9\mu + 0,35}{1 - 0,9k}$$

Обчислення показують, що похибка результатів, отриманих за формулою (2-185) по відношенню до точного рішення (2.46) не перевищує 2% при $0.4 < k < 0.9$, що є цілком прийнятним для інженерних розрахунків. Несуча здатність нижньої ділянки стінки визначається умовою [48]:

$$\sigma_{max} \leq \frac{R\gamma_c}{\gamma_n}$$

де: R – розрахунковий опір сталі; $\gamma_c = 0,7$ – коефіцієнт умов роботи нижнього пояса стінки; γ_n – коефіцієнт надійності по відповідальності резервуара.

У граничному стані напруги в серединній поверхні оболонки σ досягають критичного значення σ_{cr} . Підстановка співвідношень (2.45), (2.47), (2.48) в умову міцності (2.49) дозволяє визначити величину коефіцієнта k , а потім отримати наступний шуканий вираз для критичних напружень:

$$\sigma_{cr} = \left[3,36 - 3,55 \frac{\gamma_n \sigma_{c0}}{\gamma_c R} (2,577\mu + 1) \right] \sigma_{c0}$$

Чисельний аналіз результатів виконано за формулою (2.50), перетвореною до такого безрозмірного виду:

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_{c0}} = 3,36 - 3,55 \frac{\gamma_n \sigma_{c0}}{\gamma_c R} \left(0,515 \frac{\gamma_c R}{\gamma_n \sigma_{c0}} \frac{t_0}{t} + 1 \right)$$

В процесі отримання залежності (2.51) використовувалася формула (2.47), а також рівність, що визначає розрахункову товщину стінки резервуара при дії гідростатичного навантаження [10]:

$$t_0 = \frac{\rho g H r \gamma_n}{\gamma_c R}$$

На рис. 2.8 наведені результати розрахунку за формулою (2.51) для резервуарів об'ємом до 3000 м³ ($R = 240$ МПа, $\gamma_n = 1$), найбільш схильних до небезпеки утворення «слонової ноги». На рис. 2.8 представлені в реальному діапазоні зміни σ_{c0} , показують, що критичні напруження, обчислені за формулою (2.29), можна умовно розглядати, як середні значення, одержувані за пропонованою методикою.

На закінчення необхідно відзначити, що співвідношення (2.50), а також результати, наведені в роботах [21], [29] утворюють єдину методичну базу для розробки нових нормативних документів з проектування сейсмостійких вертикальних циліндричних сталевих резервуарів.

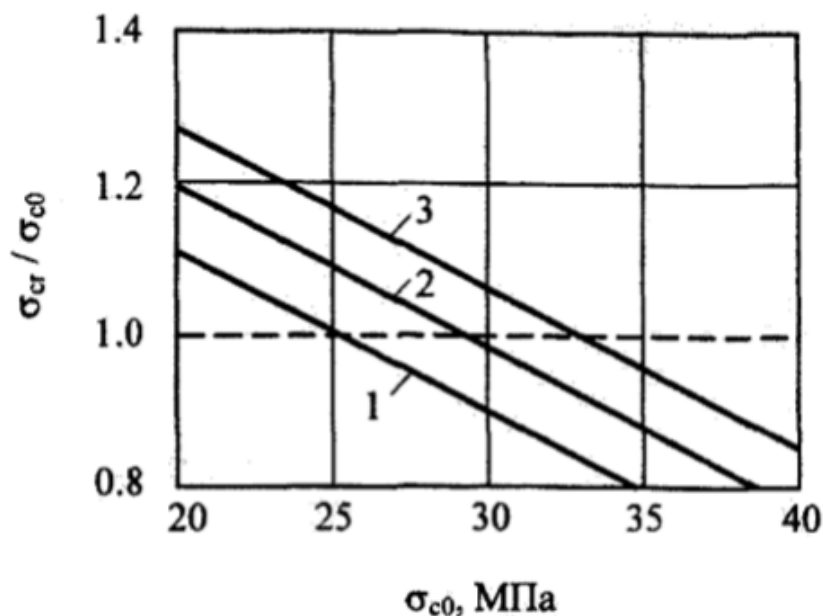


Рисунок 2.8 – Критичні напруження в стінці резервуара: 1 – $t/t_0 = 1$; 2 – $t/t_0 = 1,05$; 3 – $t/t_0 = 1,1$

2.4 Висновки до розділу 2

Розглянуто окремі наукові праці закордонних та вітчизняних вчених в області сейсмостійкості резервуарних конструкцій. Виявлено методику Хаузнера, що відтворює хвильовий ефект при сейсміці. Методика запропонована Н. А. Ніколаєнко дозволяє визначити гідродинамічний тиск за умов дії землетрусу. Методика Велестоса дозволяє визначити власні частоти коливань наповненого рідиною резервуару. Проведено чисельний аналіз результатів розрахунку резервуару та наведено основні етапи розрахунку міцності корпусу вертикального резервуару.

РОЗДІЛ 3

РОЗРАХУНОК ВЕРТИКАЛЬНОГО СТАЛЕВОГО ЦИЛІНДРИЧНОГО РЕЗЕРВУАРА НА СЕЙСМІЧНИЙ ВПЛИВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПК ЛІРА

ПК ЛІРА-багатофункціональний програмний комплекс для проектування і розрахунку будівельних і машинобудівних конструкцій різного призначення. Реалізований метод розрахунку – метод скінчених елементів (МСЕ). Виконується розрахунок на статичні (силові і деформаційні) і динамічні впливи. Моделювання та аналіз в деяких областях промисловості дозволяє уникнути дорогих і тривалих циклів розробки типу «проектування — виготовлення — випробування».

3.1 Дані для розрахунку

В якості розрахункової взята конструкція резервуара вертикального сталевого (РВС) об'ємом 4500 м² для зберігання нафтопродуктів (рис. 3.1).

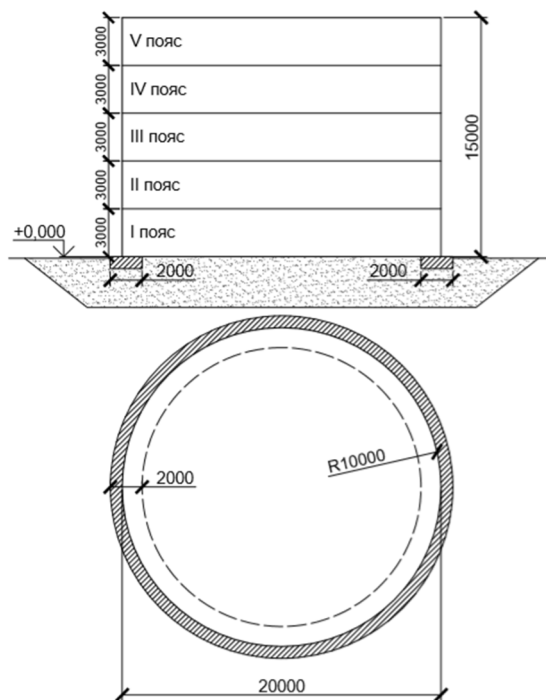


Рисунок 3.1 – Сталевий циліндричний резервуар об'ємом 4500 м²

Вихідні дані для розрахунку на сейсміку РВС-4500 м²:

- діаметр резервуара (D) – 20 м;
- висота стінки резервуара (H) – 15 м;
- відношення $H/D = 0,75$;
- щільність збереженого продукту, бензин – $0,85 \text{ т/м}^3$;
- район з сейсмічністю 7 балів;
- марка сталі С325 (листи $3 \text{ м} \times 10,0 \text{ м}$); $R_y = 315 \text{ МПа}$, $R_u = 460 \text{ МПа}$;
- товщина сталі по поясах стінки резервуара:
 - I пояс знизу - 14 мм сталь;
 - II пояс знизу - 14 мм сталь;
 - III пояс знизу - 14 мм сталь;
 - IV пояс знизу - 12 мм сталь;
 - V пояс знизу - 12 мм сталь;
- $E = 206 \text{ ГПа}$ і коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,3$.

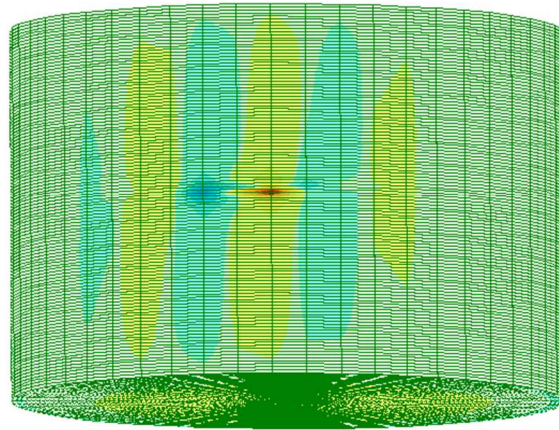
3.2 НДС в елементах сталевого циліндричного резервуара при дії сейсмічного впливу

В програмному пакеті «ЛПРА» виконано комп'ютерний експеримент, в якому виявлено показники напружено – деформованого стану моделі сталевого циліндричного резервуара при сейсмічному впливі.

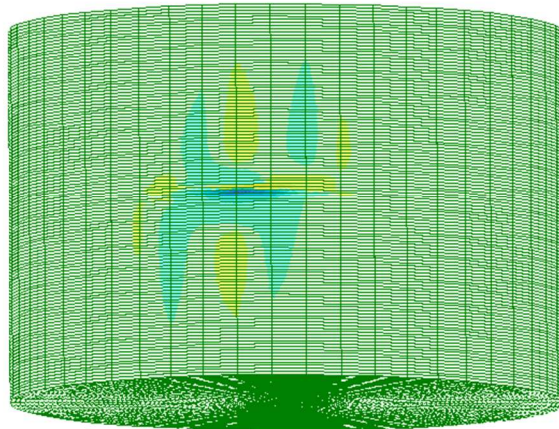
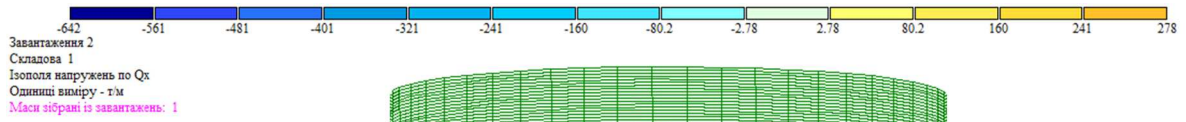
За результатами виконання експерименту отримано 4 форми коливань, 2 з яких будуть наведені і порівняні в даній роботі.

3.2.1 Результати напружень і переміщень для першої форми коливань

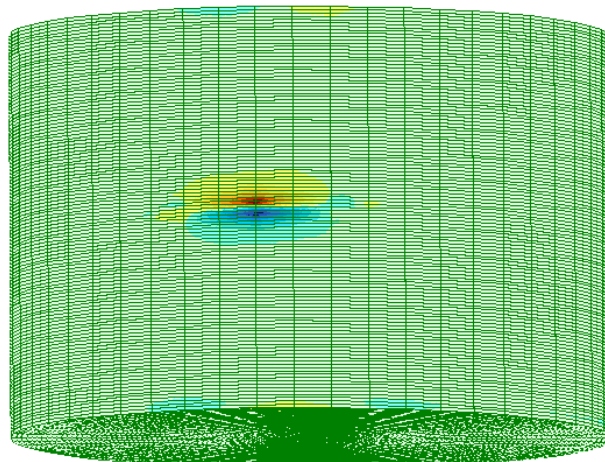
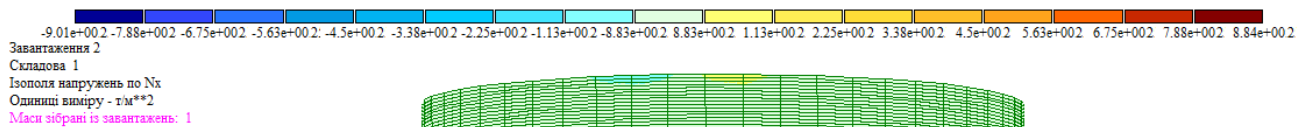
За результатами виконання комп'ютерного експерименту отримано величини та розподіл напружень (рис. 3.2) у вертикальному сталевому циліндричному резервуарі при дії сейсмічних впливів.



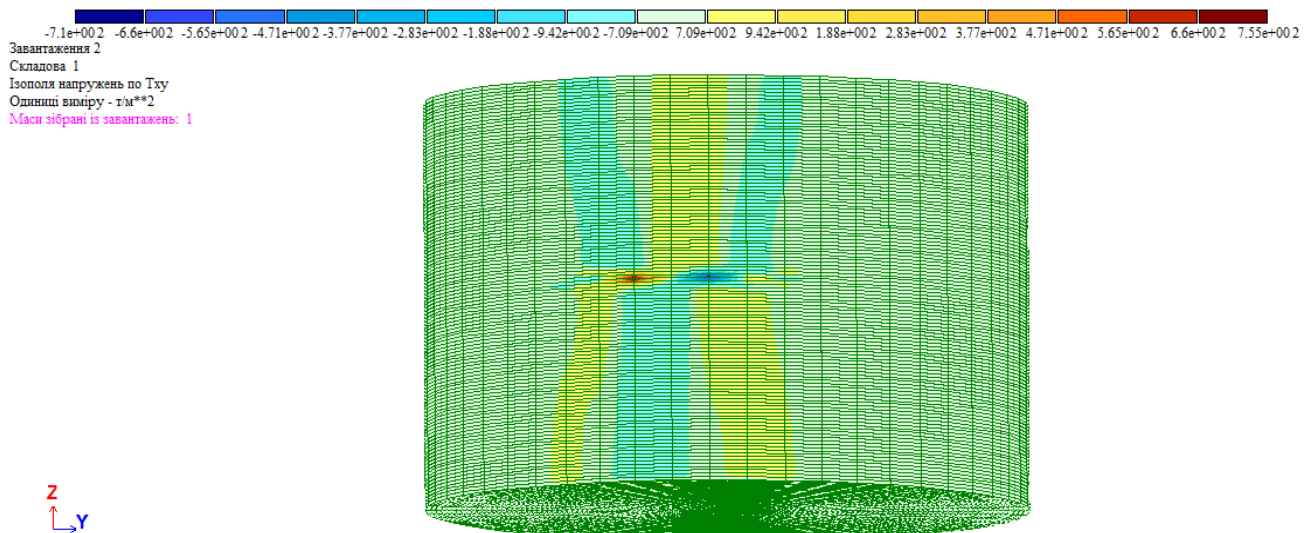
а)



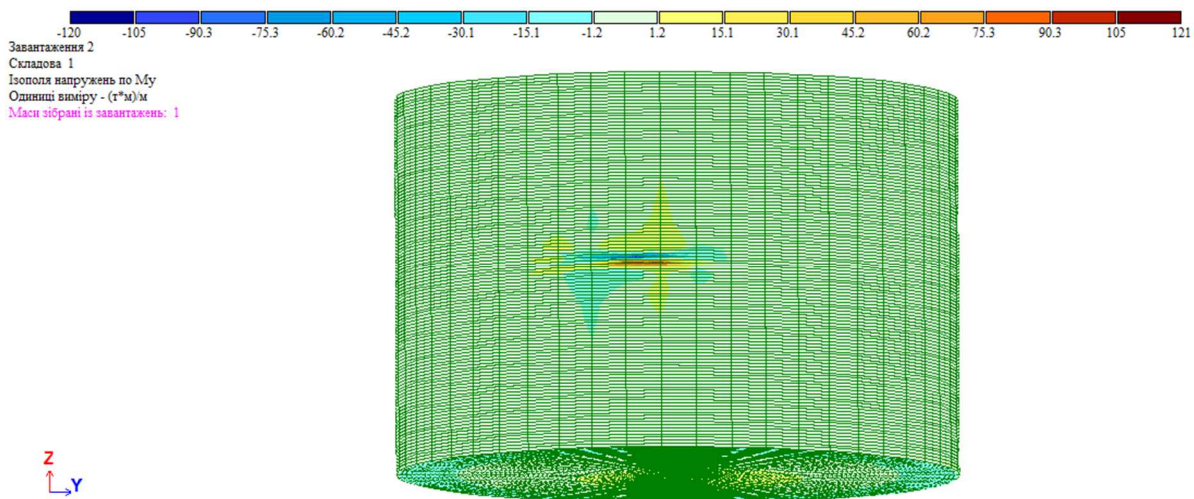
б)



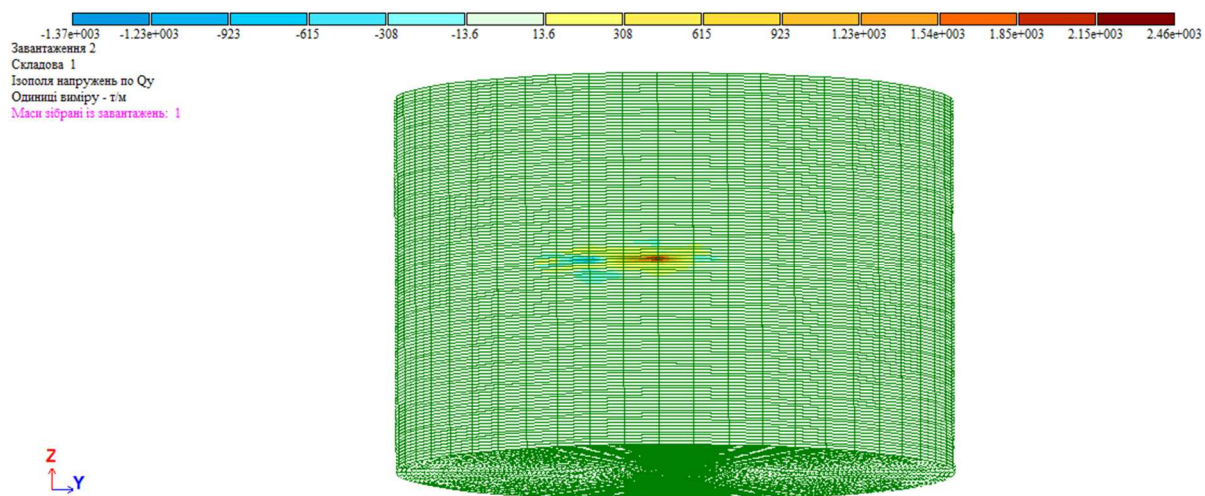
в)



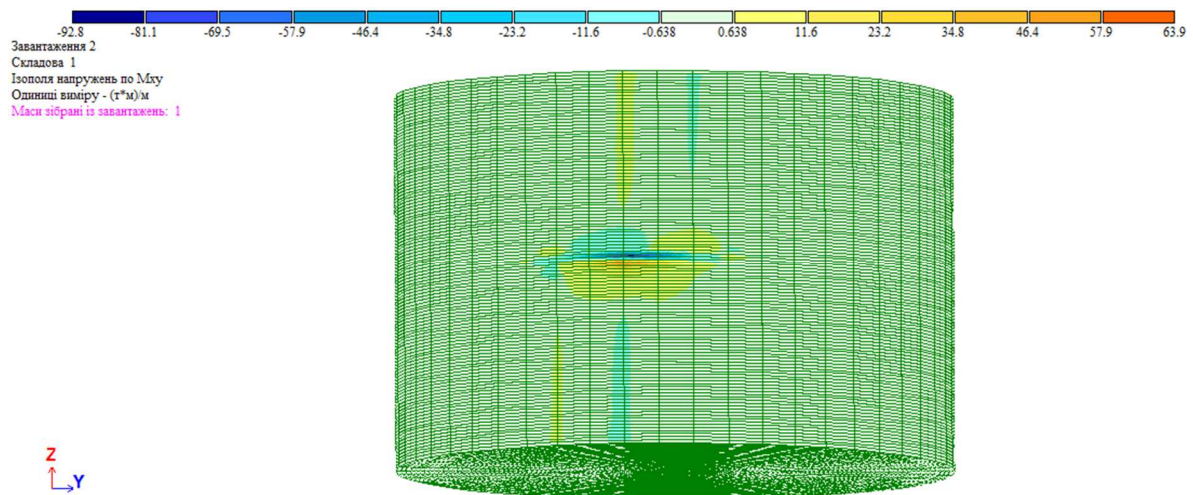
Г)



Д)



е)

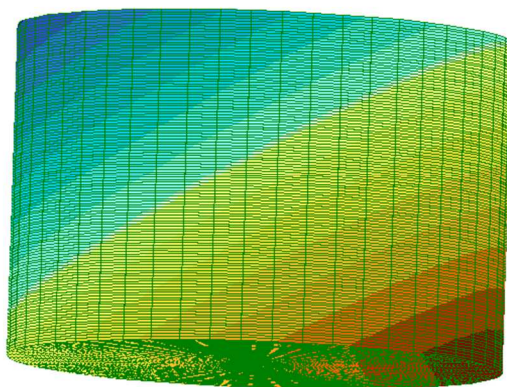


є)

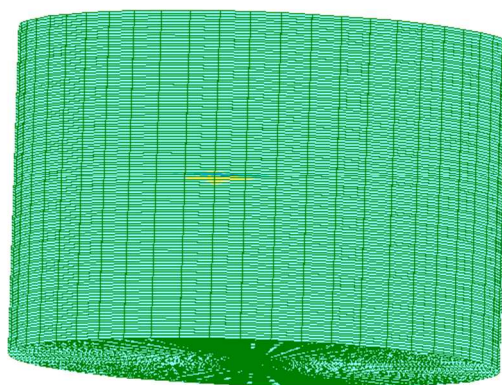
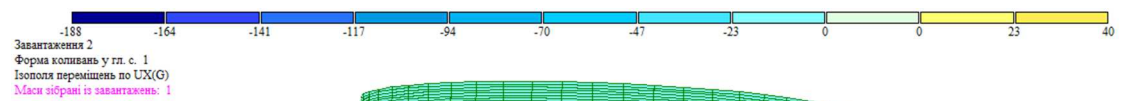
Рисунок 3.2 – Ізополю напруження сталевого циліндричного резервуара:

- а) ізополю напруження по M_x ;
- б) ізополю напруження по Q_x ;
- в) ізополю напруження по N_x ;
- г) ізополю напруження по τ_{xy} ;
- д) ізополю напруження по M_y ;
- е) ізополю напруження по Q_y ;
- ж) ізополю напруження по M_{xy} .

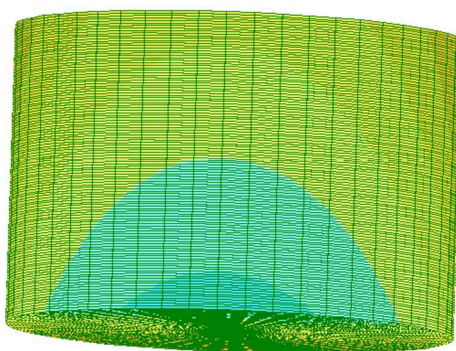
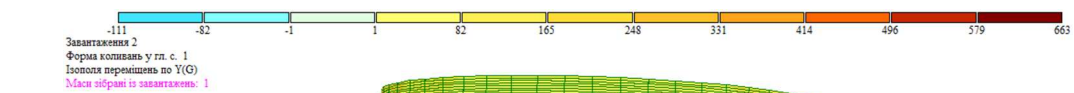
Отримані чисельні значення напружень в елементах сталевого циліндричного резервуара вказують на те, що напруження не перевищують межу міцності, похибка результатів обчислень виконаних методом скінченних елементів не перевищує граничних значень.



а)



б)



в)

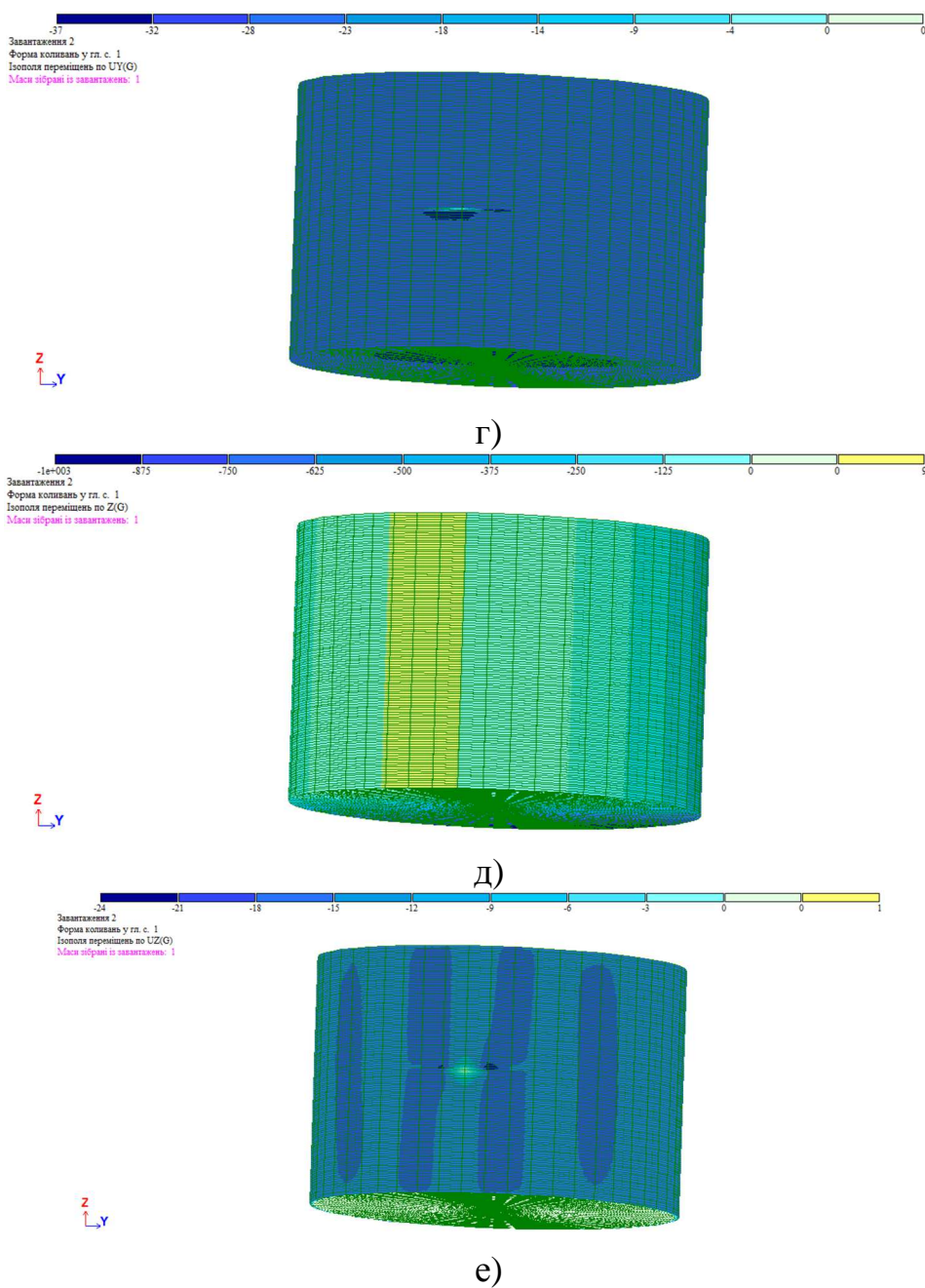
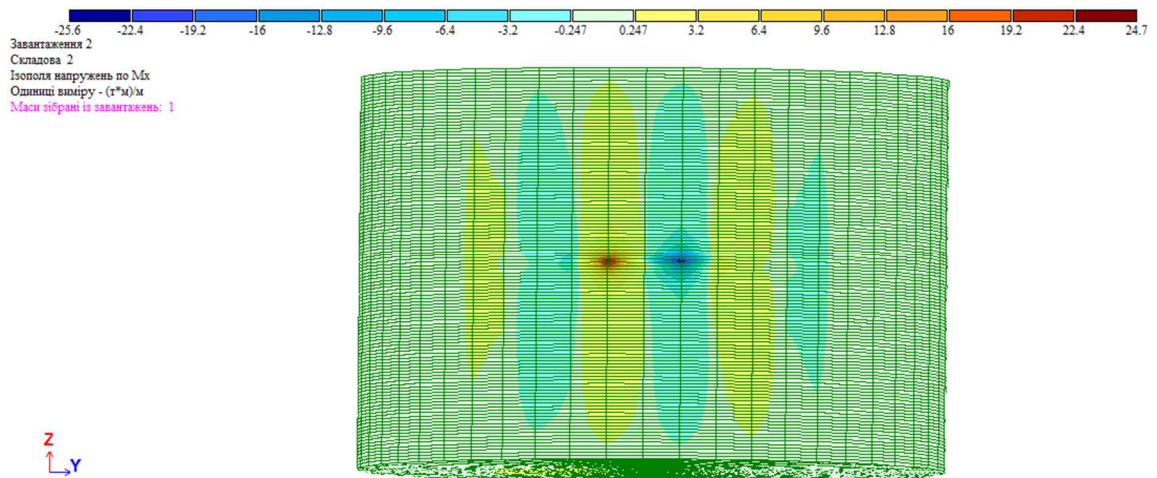


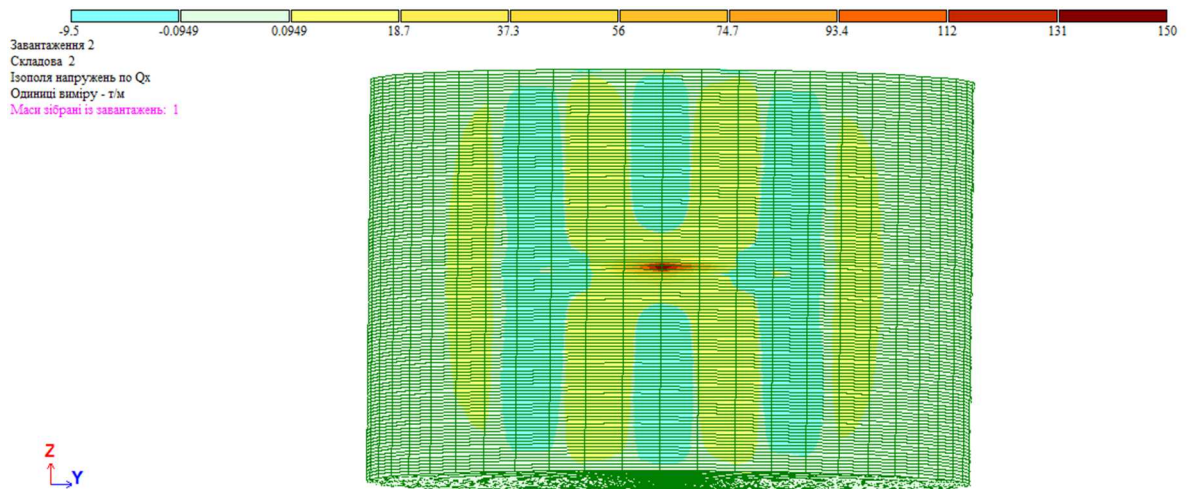
Рисунок 3.3 – Ізополю деформування сталевого циліндричного резервуара:

- а) ізополю переміщень по осі X ;
- б) ізополю переміщень по осі UX ;
- в) ізополю переміщень по осі Y ;
- г) ізополю переміщень по осі UY ;
- д) ізополю переміщень по осі Z ;
- е) ізополю переміщень по осі UZ .

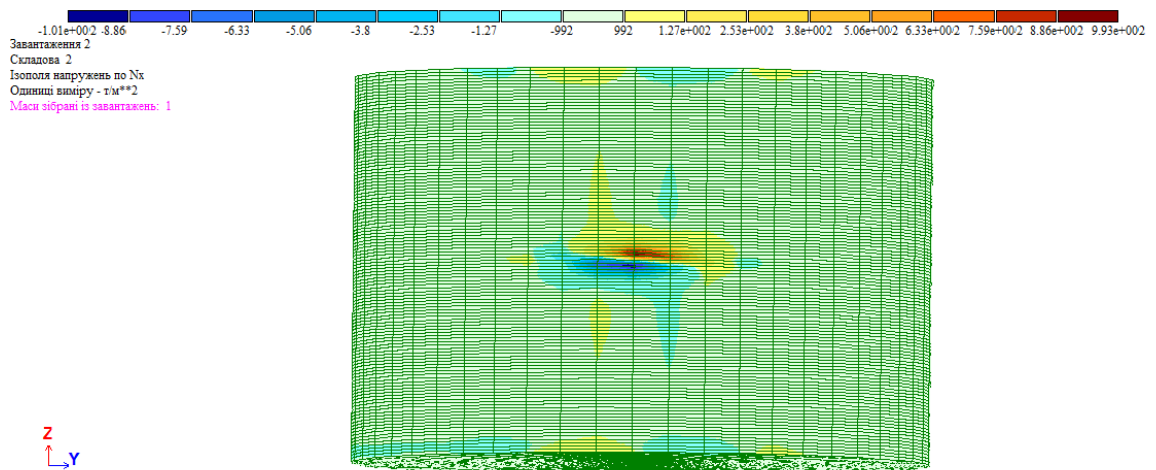
3.2.2 Результати напружень і переміщень для другої форми коливань



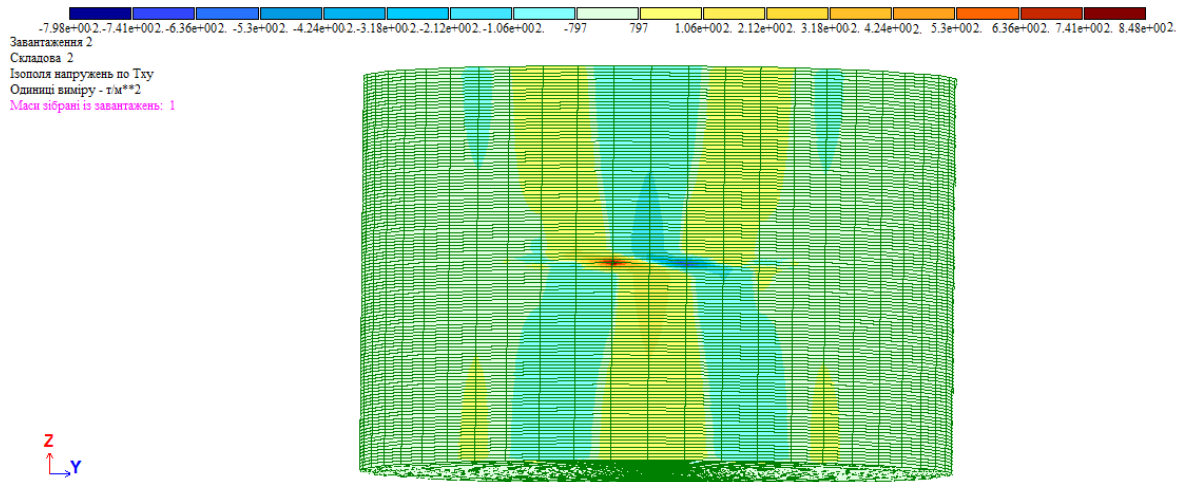
а)



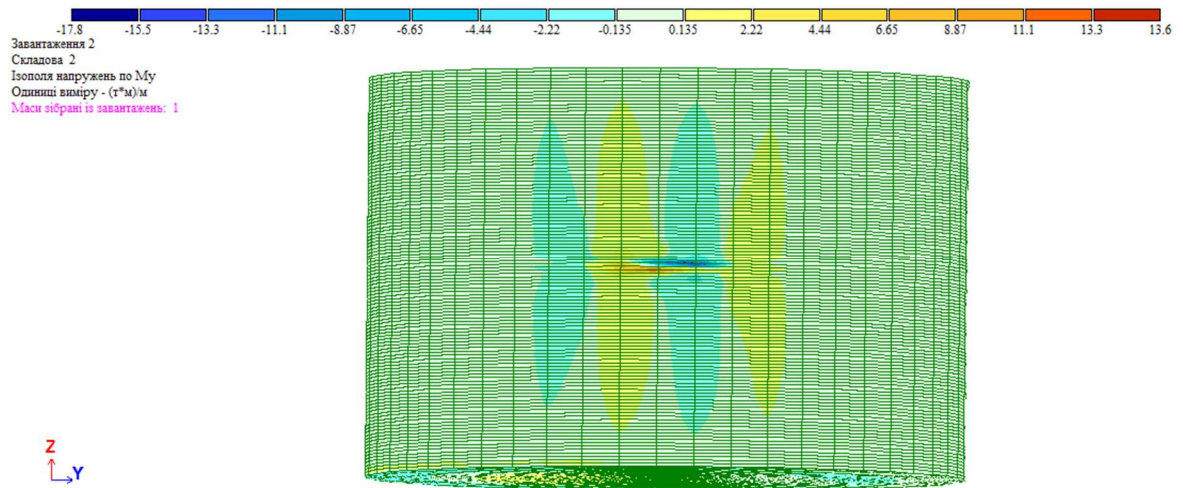
б)



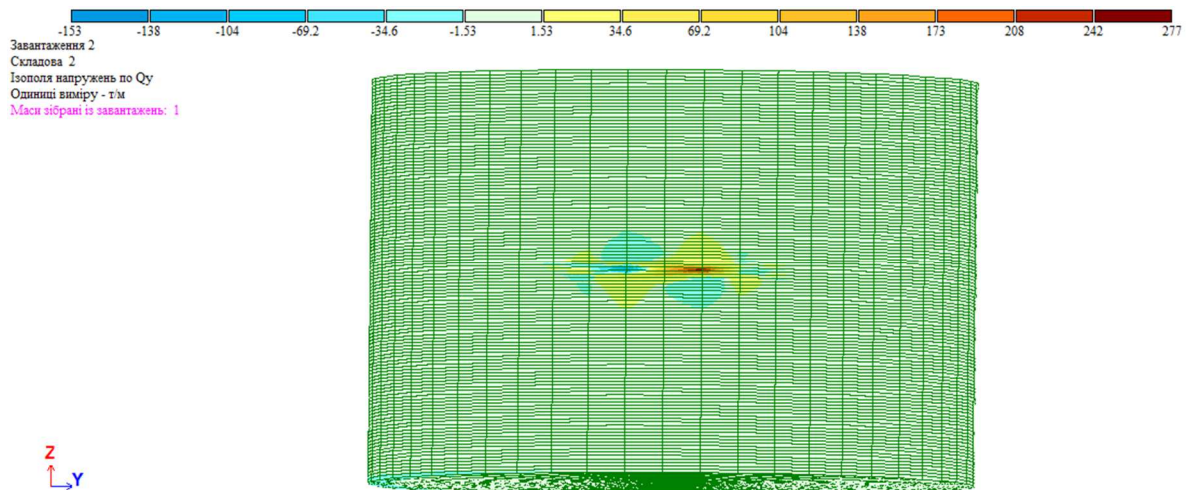
в)



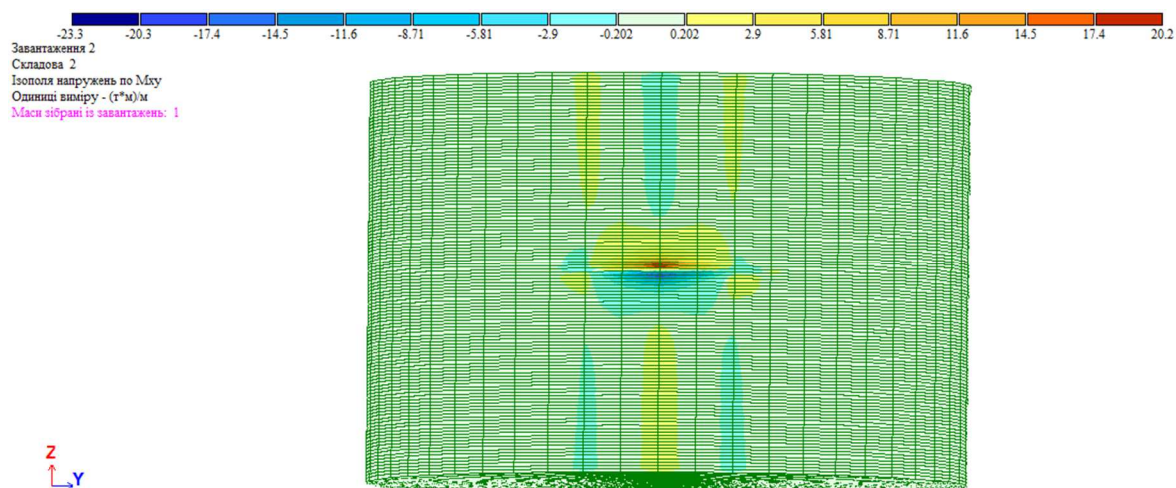
Г)



Д)



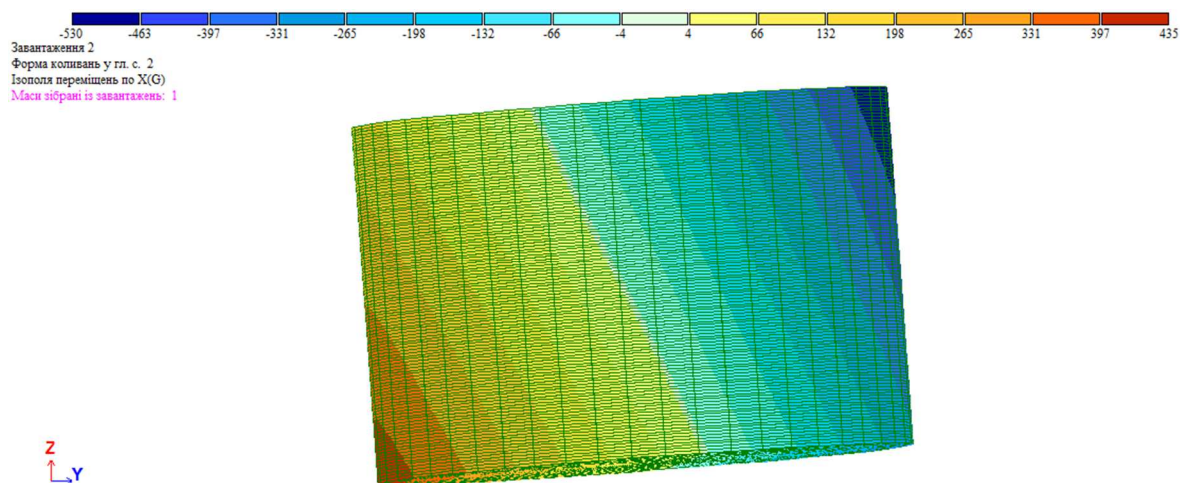
е)



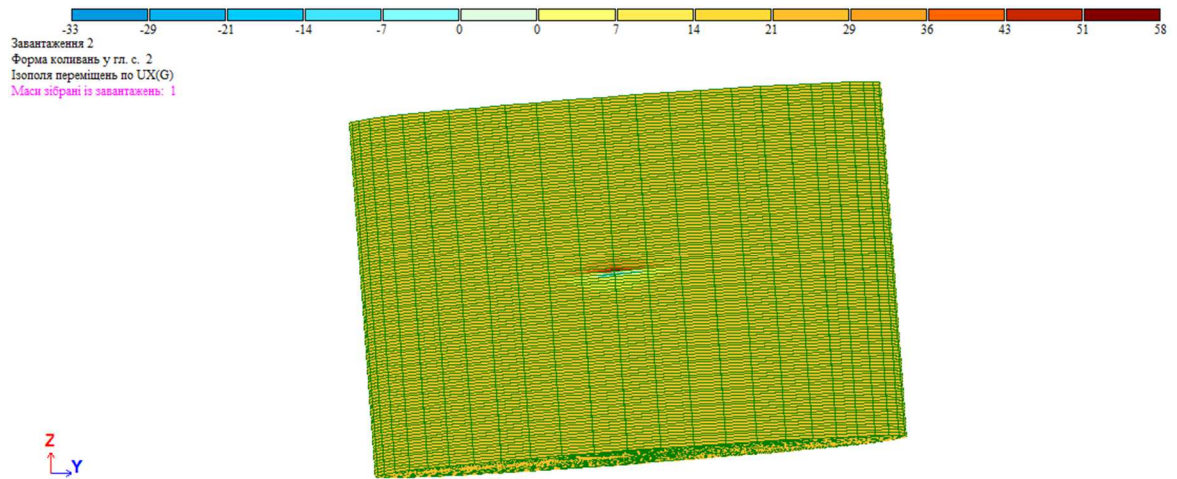
ж)

Рисунок 3.4 – Ізополя напруження сталевого циліндричного резервуара:

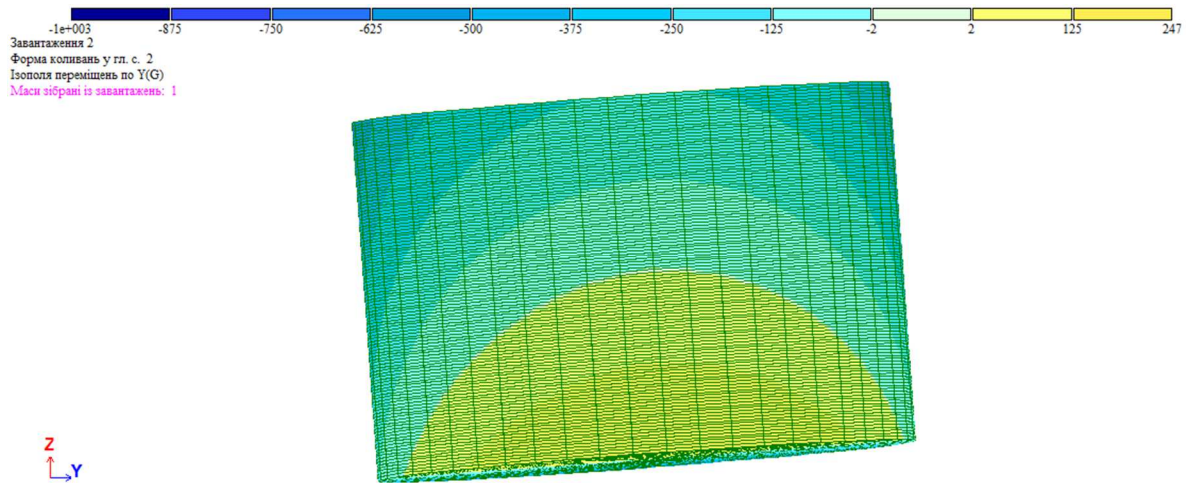
- а) ізополя напруження по M_x ;
- б) ізополя напруження по Q_x ;
- в) ізополя напруження по N_x ;
- г) ізополя напруження по τ_{xy} ;
- д) ізополя напруження по M_y ;
- е) ізополя напруження по Q_y ;
- ж) ізополя напруження по M_{xy} .



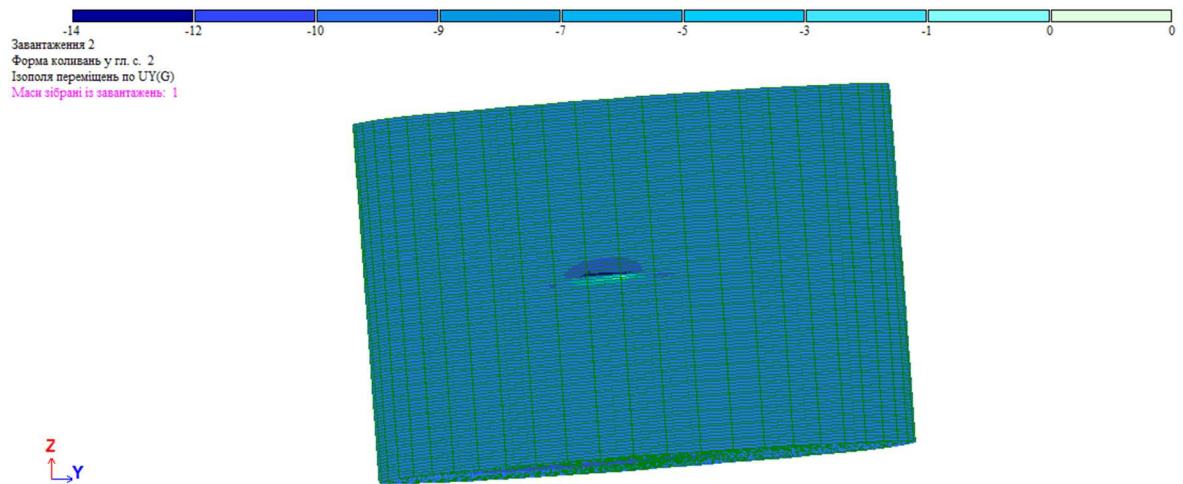
а)



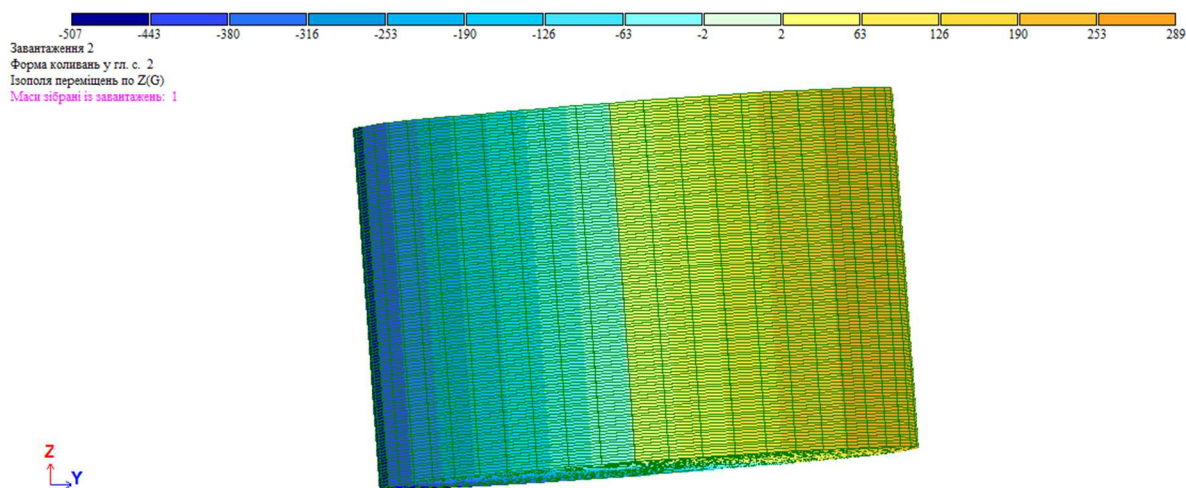
б)



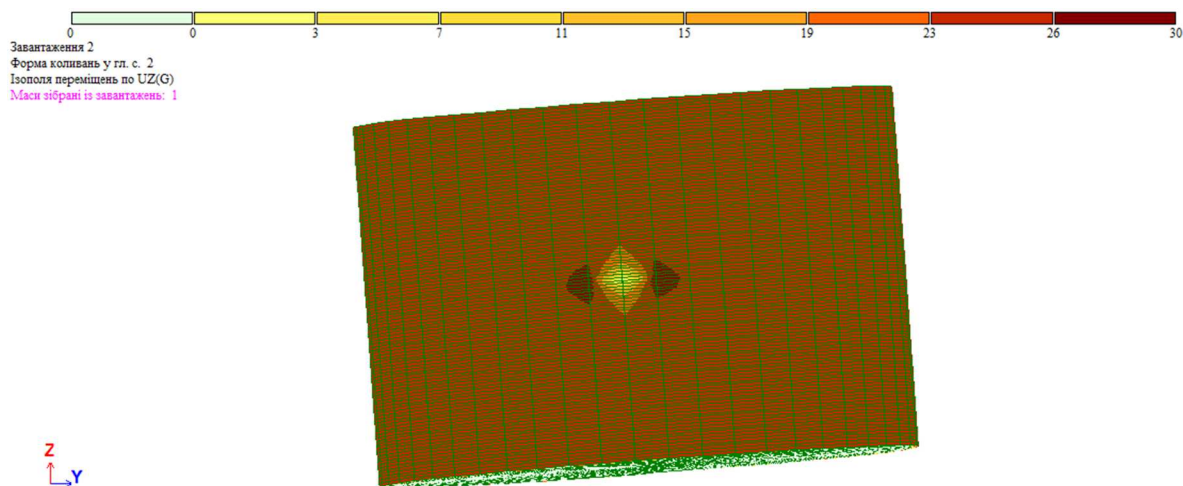
в)



г)



д)



е)

Рисунок 3.5 – Ізополя деформування сталевого циліндричного резервуара:

- а) ізополя переміщень по осі X ;
- б) ізополя переміщень по осі UX ;
- в) ізополя переміщень по осі Y ;
- г) ізополя переміщень по осі UY ;
- д) ізополя переміщень по осі Z ;
- е) ізополя переміщень по осі UZ .

Результати визначень частотних характеристик наведені в таб 3.1.

Таблиця 3.1 Частоти власних коливань

Частоти власних коливань								
№ завант	№ форми	Власні значення	Частоти		Період (с)	Коеф.рос поділ.	Мод.маса (%)	Сума мод.мас (%)
			Круг.частота (рад/с)	Частота (Гц)				
2	1	130.808	0.008	0.001	821.890	0.668	22.763	22.763
2	2	107.663	0.009	0.001	676.468	0.340	1.776	24.540
2	3	17.470	0.057	0.009	109.764	- 0.759	9.992	34.531
2	4	9.649	0.104	0.016	60.624	- 0.456	3.401	37.932
2	5	8.944	0.112	0.018	56.196	0.050	0.044	37.976

3.3 Висновки до розділу 3

Визначено фізико-механічні властивості матеріалу та геометричні параметри вертикального резервуару.

Розроблено повнорозмірну скінченно-елементну модель наповненого вертикального сталевго резервуару. У ПК «ЛІРА» виконано розрахунок параметрів НДС наповненого вертикального сталевго резервуару. Отримано значення частот та періодів власних коливань. Встановлено, що запропонований спосіб розрахунку не перевищує похибки обчислень вказаної в п.2.3

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Характеристика об'єкту з точки зору охорони праці

Відповідно до ДБН А.3.2-2-2009 «Охорона праці і промислова безпека в будівництві. Основні положення» небезпечні і шкідливі фактори - це виробничі фактори, вплив яких може призвести до погіршення здоров'я робітників чи травм. Згідно п.5 проводиться організація управління охороною праці. Площі санітарно-побутових приміщень проводяться згідно т.6.1 ДБН А.3.2-2-2009.

Під час монтажу будівельних конструкцій основними шкідливими виробничими факторами слід вважати:

- машини і механізми, що рухаються і працюють, включаючи вантажопідіймальні;
- переміщення при підйомі і установці в проектне положення конструктивних елементів будівельних конструкцій, а також укрупнених блоків будинків і споруд;
- втрату стійкості монтуємих чи змонтованих будівельних майданчиків;
- розташування робочого місця на висоті від поверхні землі, підлоги, міжповерхових перекриттів і робочих чи монтажних площадок;
- недостатню освітленість робочої зони;
- дію вітру на вантажопідіймальні крани, а також на окремо змонтовані будівельні конструкції чи частини будинків і споруд;
- фізичні перевантаження при перенесенні вантажів вручну;
- підвищену чи знижену температуру повітря робочої зони;
- небезпечну і шкідливу дію на людей електричного струму, електричної дуги, електромагнітного випромінювання і статичної електрики;

- вплив підвищеного рівня ультрафіолетового і інфрачервоного випромінювань при виконанні електрозварювальних робіт, а також іонізуючих випромінювань при контролі якості зварених швів;
- токсичний і дратівний вплив на дихальні шляхи газів і аерозолів, що утворюються при зварювальних роботах;
- токсичний і дратівний вплив лакофарбових матеріалів, а також пари від них на дихальні шляхи людини при виконанні антикорозійних робіт;
- використання порохового монтажного інструмента.

Фахівцям, робота яких пов'язана з експлуатацією ємностей для нафтопродуктів, в обов'язковому порядку доводиться інструкція, в якій перераховані їх безпосередні обов'язки і правила, що стосуються охорони праці і, в першу чергу, зачіпають дотримання пожежної безпеки:

- Заборона на куріння на території підприємства;
- використання спецодягу з неелектризуючих матеріалів;
- застосування в роботі безпечних, з точки зору утворення іскор, інструментів і пристосувань;
- проведення зварювальних робіт тільки після письмового дозволу відповідальної за безпеку особи.

Це лише невелика частина заходів, що стосуються запобігання головного ризику на будь – якому нафтопереробному виробництві – виникнення пожежі.

4.2 Безпека в надзвичайних ситуаціях

4.2.1 Оцінка стійкості об'єкта будівництва від надзвичайних ситуацій природнього характеру

Зведення багатьох об'єктів будівництва в даний час неможливо без урахування їх реакції на сейсмічні навантаження. Дослідження їх міцності

експериментальними методами без глибокого теоретичного аналізу не дає необхідних результатів.

4.2.2 Коротка характеристика впливу надзвичайних ситуацій природного характеру

В Україні щороку виникає від 100 до 300 надзвичайних ситуацій природного походження. Стихійні лиха — це небезпечні природні явища, процеси атмосферного, гідрологічного, геологічного, біосферного або іншого походження таких масштабів, які призводять до катастрофічних ситуацій з раптовим порушенням систем життєдіяльності населення, руйнуванням і знищенням матеріальних цінностей, об'єктів народного господарства, що у свою чергу може спричинити аварії й катастрофи. Справжнім лихом є землетруси, повені, зсуви, селеві потоки, бурі, урагани, снігові заноси, пожежі лісів, торфу, полів і населених пунктів. Тільки за останні 20 років вони забрали життя більше трьох мільйонів чоловік. За даними ООН, за цей період майже один мільярд жителів нашої планети потерпіли від стихійних лих. Для ліквідації їх наслідків залучаються сили і засоби цивільного захисту, часто значна частина населення і військові формування, а на відповідні роботи витрачаються багато сил і великі матеріальні кошти. Кожне стихійне лихо має свої причини виникнення, притаманні тільки йому особливості впливу на навколишнє середовище, фізичну суть і рушійні сили. Проте їм характерні й загальні властивості — це великий просторовий захват, сильна психологічна дія на населення і значний вплив на навколишнє середовище. Знаючи характер стихійних лих, причини їх виникнення, можна завчасно вжити заходів і тим самим запобігти деяким з них або значно зменшити їх руйнівний вплив, спланувати правильні дії населення для проведення рятувальних робіт. Велике значення має проведення профілактичних робіт з метою запобігання збиткам від стихії або зменшення їх. Важливо своєчасно провести роботи, спрямовані на локалізацію стихійного лиха, щоб зменшити зони руйнувань, скоротити до

мінімуму збитки і своєчасно надати допомогу потерпілим. В Україні найчастіше спостерігаються такі надзвичайні ситуації природного походження: — небезпечні геологічні явища: зсуви, обвали, осипки, просадки земної поверхні різного походження; — небезпечні метеорологічні явища: зливи, урагани, сильні снігопади, сильний град, ожеледь; — небезпечні гідрологічні явища: повені, паводки, підвищення рівня ґрунтових вод; — природні пожежі лісових та торф'яних масивів; — масові інфекції та хвороби людей, тварин, рослин.

4.2.3 Заходи при землетрусі

Івано-Франківська область, як частина Карпатського регіону, відноситься до сейсмонебезпечних регіонів України. Сейсмічна активність, як і в будь-якому куточку планети, фіксується постійно, але більшість землетрусів не відчутна. Останні раз сейсмічні поштовхи відчувались на території Івано-Франківщини 27 жовтня 2004 року під час землетрусу з епіцентром у Румунії. Інтенсивність землетрусу на Івано-Франківщині склала 2-3 бали за шкалою MSK-64.

Епіцентрами більшості землетрусів, які відчутно коливають Івано-Франківську область, знаходяться у Румунії в зоні Вранча. Вплив цієї сейсмічної зони на Івано-Франківську область може, теоретично, досягати 8 балів за шкалою MSK-64, тобто, можна очікувати великі тріщини в стінах і слабкі руйнування будинків, падіння труб, пам'ятників. Хоча найвищий бал 6 і подекуди 7 було зафіксовано в 1802 році. Землетруси починаються раптово і охоплюють значні території. Руйнування будівель, зсуви і обвали крутих схилів є головними причинами людських жертв і великих матеріальних збитків при сильних землетрусах. Сейсмічними вважають райони, де зареєстровані або теоретично очікувані землетруси у 6 балів та вище. Основні вимоги до будівництва у сейсмічних районах зведено до вжиття таких заходів: 1. Вибір ділянки для будівництва. 2. Вибір конструктивного рішення (КР) та об'ємно-планувального рішення (ОПР). 3. Забезпечення високої якості будівництва. 4. Поділ будівель і

споруд антисейсмічними швами. Будівельні майданчики під населені пункти і споруди обираються з урахуванням геологічних даних, якнайдалі від можливих або явних розривних по-рушень, далеко від крутих схилів, що загрожують обвалами і зсувами. Несприятливими для будівництва вважають пухкі ґрунти і тріщинуваті породи. При виборі ділянки для забудови враховують такі поняття як сейсмостійкість будівельних об'єктів та сейсмічність будівельного майданчика. Сейсмостійкістю називають здатність ґрунтів, будівель і споруд протистояти сейсмічним впливам. Заходи з підвищення сейсмостійкості будівель застосовуються у районах із сейсмічністю у 7 балів і вище. Нормативне обґрунтування цих заходів здійснюється за «ДБН В.1.112:2006. Будівництво у сейсмічних районах України». За сейсмічності більше 9 балів зведення капітальних будівель заборонено.

4.2.4 Заходи щодо підвищення стійкості об'єкта

Одне з основних завдань в області цивільного захисту ЦЗ - проведення заходів, спрямованих на підвищення стійкості роботи об'єктів в умовах надзвичайних ситуацій мирного і воєнного часу. Під стійкістю функціонування будівельного об'єкта розуміють здатність його в надзвичайних ситуацій виконувати покладену на нього функцію, а при отриманні слабких і середніх руйнувань або порушенні зв'язків з постачання, відновлювати виконання покладеної функції в мінімальні терміни. Розглянутий мною об'єкт будівництва є не стійким до дії ударних хвиль, тому що розглянуті мною безкаркасні арочні ангари мають невелику товщину стінки і власну вагу, що не забезпечує належної стійкості будівлі, отже, необхідно розробляти низку заходів щодо підвищення його стійкості. Для цього необхідно зробити наступне: 1. Підвищити стійкість промислової споруди шляхом встановлення більш міцного металевого каркасу, встановлення більш міцних рам для дверей і вікон, зменшення прольоту несучих конструкцій, а також зміцнення стін будівлі більш міцними матеріалами. 2. Для

підвищення стійкості кранів та кранового обладнання до впливу ударної хвилі доцільно забезпечити їх жорстку фіксацію на міцному фундаменті, розташовувати устаткування за міцними елементами будівлі і споруд на ймовірному напрямку дії ударної хвилі, забезпечити додаткові точки фіксації і кріплення. Також необхідно встановлювати контрфорси, що підвищують стійкість обладнання до дії швидкісного напору ударної хвилі. 3. Для підвищення стійкості кабельних наземних ліній слід помістити їх під землю, також можливе їх зміцнення за рахунок укладання їх всередину, а також за рахунок застосування броньованих кабелів.

4.2.5 Системи сейсмозахисту будівель і споруд

Загальна класифікація систем сейсмозахисту споруд представлена на рис. 4.2. Вона складається з традиційних методів забезпечення сейсмостійкості та спеціальних засобів сейсмозахисту.



Рисунок 4.2 - Загальна класифікація систем сейсмозахисту споруд

ВИСНОВКИ

1. Розглянути класифікацію та основну типізацію вертикальних сталевих циліндричних резервуарів.
2. Виявлено основні вимоги до статичних розрахунків наповнених вертикальних сталевих циліндричних резервуарів та проведено аналіз основних пошкоджень наповнених вертикальних сталевих циліндричних резервуарів, що виникають внаслідок дії сейсміки.
3. Розглянути існуючі аналітичні підходи для визначення НДС наповнених вертикальних сталевих циліндричних резервуарів при дії сейсміки.
4. Розроблено скінченно-елементну модель наповненого вертикального сталевих циліндричного резервуару;
5. За допомогою методу скінченних елементів проведено розрахунок наповненого вертикального сталевих циліндричного резервуару на дію сейсмічних навантажень;
6. На підставі аналізу НДС отримано величини і розподіл напружень та деформацій наповненого вертикального сталевих циліндричного резервуару при дії сейсмічних навантажень. Встановлено, що запропонований спосіб моделювання та розрахунку параметрів НДС вертикального сталевих циліндричного резервуару дає достовірні результати, а похибка обчислень не перевищує встановлених значень.

БІБЛІОГРАФІЯ

1. Николаенко Н. А. Динамика и сейсмостойкость конструкций, несущих резервуары. - М ; Госстройиздат, 1963.
2. Бабицкий И.Ф., Вихман ГЛ. Вольфсон С.И. Расчет и конструирование аппаратуры нефтеперерабатывающих заводов. М., Недра, 1965.
3. Вайнберг Д.В., Вайнберг Е.Д. Пластины, диски, балки-стенки. М., Госстройиздат, 1959.
4. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. М., Наука, 1976.
5. Справочник проектировщика. Металлические конструкции, под ред. В.В. Кузнецова 1998 г.
6. Клейн Г.К. Расчет труб, уложенных в земле. М., Госстройиздат, 1957; Расчет подземных трубопроводов. М., Госстройиздат, 1969.
7. ДБН В.2.6-198:2014 «Сталеві конструкції. Норми проектування».
8. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи: Норми проектування. – Київ: Мінбуд України, 2006. – 75 с.
9. Методичні вказівки до практичних занять "Статичний аналіз напруженодеформованого консольного сталевго стержня" з дисципліни "Метод скінченних елементів в механіці споруд" / Укладачі: Ю.І.Пиндус, О.П. Конончук. Тернопіль ТНТУ 2016 . 26 с.
10. Мельников Н.П. Металлические конструкции за рубежом. М., Стройиздат, 1971.
11. Основи автоматизації проектування в будівництві: конспект лекцій для студентів, які навчаються за спеціальністю "Будівництво та цивільна інженерія". / Укладачі: А.П. Сорочак. Тернопіль ТНТУ 2016 .
12. Ручимский М.Н. Некоторые вопросы расчета новых типов сварных горизонтальных резервуаров в свете их натуральных испытаний. Труды ВНИИстройнефти, в.ш.1Х, М., 1957.

- 13.Сафарян М.К. Стальные резервуары для хранения нефтепродуктов (исследования работы конструкций). ОНТИ ВНИИСТ, 1958.
- 14.Сафарян М.К., Иванцов О.М. Проектирование и сооружение стальных резервуаров. М., Гостоптехиздат, 1961.
- 15.Сафарян М.К., Ашкинази М.И., Чолоян Г.С. Стальные резервуары со сфероцилиндрической кровлей для нефтепродуктов. Научное сообщение ВНИИСТ, М., 1961.
- 16.Сафарян М.К. Современное состояние резервуаростроения и перспективы его развития. ЦНИИТЭ нефтехим. Тематические обзоры, 1972.
- 17.Програмне забезпечення інженерних розрахунків: конспект лекцій для студентів, які навчаються за спеціальністю “Будівництво та цивільна інженерія”. / Укладачі: А.П. Сорочак. Тернопіль ТНТУ 2018.
- 18.Закон України «Про охорону праці» від 01.01.2004 № 229-IV.
- 19.Закон України «Про пожежну безпеку» від 17.12.1993 № 3745-XII.
- 20.Кодекс цивільного захисту України від 02.10.2012 №5403-VI.
- 21.ДБН А.3.2-2-2009. Охорона праці і промислова безпека у будівництві. – К.: 2009. – 115ст.
- 22.Геврик Е. А. Охрана труда. - М.: Эльга; Ника-Центр, 2003. - 280 с.
- 23.ДБН В.1.4-2.01-97. Радіаційний контроль будівельних матеріалів та об'єктів будівництва. – Київ: Мінбуд України, 1997. – 78 с.
- 24.Корсак К. В., Плахотнік О. В. Основи сучасної екології: Навч. посіб. — 4-те вид., перероб. і допов. — К.: МАУП, 2004. — 340 с.
- 25.Екологічна експертиза: теорія, методологія, практика / О. Я. Лазор; Укр. акад. держ. упр. при Президентові України. - Л. : Ліга-Прес, 2002. - 362 с.
- 26.Кодекс цивільного захисту України від 02.10.2012 № 5403-VI, пункт 11, частини 1, статі 2.
- 27.ДБН А.2.2-1-2003. Склад і зміст матеріалів оцінки впливів на навколишнє середовище (ОВНС) при проектуванні і будівництві підприємств, будинків і споруд. – К.: Укрархбудінформ, 2004 – 83 с.

- 28.Методика оцінки збитків від наслідків НС, затверджена настановою КМУ від 15.02.2002 №175.
- 29.Закон України «Про охорону праці» (Постанова ВР від 14.10.1992р. №2695XII (2695-12) . Режим доступу: - <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/annot/2694-12>.
- 30.«Положення про розробку інструкцій з охорони праці» (Наказ Міністерства праці та соціальної політики України та комітету по нагляду за охороною праці від 29.01.1998р. №9).
- 31.«Типове положення про навчання з питань охорони праці» (Наказ Державного комітету України з охорони праці від 26.01.2005р. №15). Режим доступу: - <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/z0231-05>.
- 32.ДБН В.1.1-7-2002 Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Режим доступу: - <http://document.ua/docs/tdoc300.php>.
- 33.Eurocode 8, “Design provisions for earthquake resistance of structures, Part 1- General rules and Part 4 - Silos, tanks and pipelines”, European Committee for Standardization, Brussels, 1998.
- 34.Veletsos, A.S., and Yang, J.Y., Dynamics of Fixed Base Liquid Storage Tanks, Proceedings of U.S.-Japan Seminar on Earthquake Engineering Research with Emphasis on Lifeline Systems, Japan Society for Promotion of Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, November 1976, pp. 317-341.
- 35.Сеницкий Ю. Э. Исследование упругого деформирования элементов конструкций при динамических воздействиях методом конечных интегральных преобразований. - Саратов: Изд-во Саратов, ун-та, 1985. - 176 с.
- 36.American Petroleum Institute, Welded Steel Tanks for Oil Storage, API Standard 650, 7th Edition, Washington, D.C., 2003.
- 37.American Water Works Association (2003). AWWA Standard for Welded Steel Tanks for Water Storage, AWWAD100, Denver, Colorado.
- 38.Сеницкий Ю. Э., Галкин А. А., Дидковский О. В., Еленицкий Э. Я. Влияние плавающей крыши на распределение гидродинамического давления в цилиндрических резервуарах с плавающей крышей при сейсмическом

воздействии. // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. - 2003.-№ 1 ,с. 10-14.

39.Сеницкий Ю. Э., Галкин А. А., Дидковский О. В., Еленицкий Э. Я. Динамическая реакция взаимодействия плавающей крыши цилиндрического резервуара с жидкостью при вертикальном сейсмическом воздействии. // Известия ВУЗов. Строительство. - 2004. - № 8, с. 32-40.

40.Сеницкий Ю. Э., Галкин А. А., Дидковский О. В., Еленицкий Э. Я. Исследование динамической реакции взаимодействия плавающей крыши цилиндрического резервуара с жидкостью при горизонтальных сейсмических воздействиях. // Известия ВУЗов. Строительство. - 2006. -№3-4, с. 19-28.

41.American Society of Civil Engineers (1984). Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems, New York.

42.American Water Works Association, AWWA Standard for Welded Steel Tanks for Water Storage, American Welding Society, New England Water Works Association, AWWA D100-84, Denver, Colorado, March 1985.

43.Housner, G., Dynamic Pressure on Accelerated Fluid Containers, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 47, 1957, pp. 15-35.

44.Вольмир А. С. Оболочки в потоке жидкости и газа. Задачи аэроупругости. - М.: Наука, 1976.-416 с.

45.Филин А.П. Элементы теории оболочек. - Л.: Стройиздат, 1987, 384 с.

46.Еленицкий Э.Я. Расчет узла сопряжения стенки и днища вертикальных цилиндрических стальных резервуаров.//Строительная механика и расчет сооружений. 2007. №4. С.2-7.

47.ПБ 03-605-03. Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. — М.; Госгортехнадзор России, 2003,176с.

48.Еленицкий Э.Я. Обеспечение сейсмостойкости вертикальных цилиндрических стальных резервуаров //Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2006. №5. С.45-49.

- 49.Housner, G.W., "The Dynamic Behavior of Water Tanks" B.S.S.A, Vol.53, № 2, 1963.
- 50.Барабаш М.С., Кір'язєв П.М., Лапенко О.І., Ромашкіна М.А. **ОСНОВИ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**. 2019.
- 51.Jacobsen, L.L. (1949) "Impulsive Hydrodynamics of Fluid inside a cylindrical container, and of fluid Surrounding a Cylindrical Pier", B.S.S.A., Vol.39,№3,1949.
- 52.Harim, M.A., and Abdel Hafiz, E.A., A Simplified Seismic Analysis of Rigid Base Liquid Storage Tanks Under Vertical Excitations with Soil- Structure Interaction, International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 5, No. 4, October 1986, pp. 217-225.
- 53.Malhotra, P. K. "Siew method for seismic isolation of liquid-storage tanks." J. Earthquake Eng. Struct. Dyn., 1997, 839-847.
- 54.Veletsos, A.S., and Yang, J.Y., Earthquake Response of Liquid Storage Tanks, Proceedings of the EMD Specialty Conference, ASCE, Raleigh, N.C., 1977, pp. 1-24.
- 55.Veletsos, A.S., Seismic Effects in Flexible Liquid Storage Tanks, Proceedings of the 5th World Conference on Earthquake Engineering, Rome, Italy, Vol. 1,1974, pp. 630-639.
- 56.Гольденблат И. И., Николаенко Н. А. Расчет конструкций на действие сейсмических и импульсных сил. - М; Госстройиздат, 1961 - 320 с.
- 57.Гольденблат И. И., Николаенко Н. А., Штоль А. Т., Тумасов В. Р. Рекомендации по расчету резервуаров и газгольдеров на сейсмические воздействия. // ЦНИИСК - М: Стройиздат, 1969,45 с.