

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»

На правах рукопису

Цибульник Сергій Олексійович

УДК 004.925.8:519.876.5:699.83

Вдосконалення засобів функціональної діагностики та захисту  
резервуарів на основі імітаційного моделювання

05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин

Дисертація на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Науковий керівник  
Бурау Надія Іванівна,  
доктор технічних наук,  
професор

Київ – 2015

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП.....	6
1 ПРОБЛЕМА ОЦІНКИ ПОТОЧНОГО ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБ'ЄКТІВ З ЕКОЛОГІЧНО-НЕБЕЗПЕЧНИМИ РЕЧОВИНАМИ.....	13
1.1 Загальна характеристика об'єктів для зберігання екологічно- небезпечних речовин .....	13
1.1.1 Класифікація об'єктів для зберігання екологічно-небезпечних речо- вин .....	14
1.1.2 Матеріали конструкції об'єктів з екологічно-небезпечними речови- нами .....	15
1.1.3 Фактори, які впливають на зниження несучої здатності об'єктів для зберігання екологічно-небезпечних речовин .....	19
1.2 Резервуари для зберігання екологічно-небезпечних речовин .....	23
1.2.1 Основні причини втрати несучої здатності резервуарів .....	26
1.2.2 Загальна характеристика проблеми зберігання екологічно- небезпечних речовин на території Антарктики .....	31
1.3 Шляхи попередження витоку екологічно-небезпечних речовин та втрати несучої здатності резервуарів .....	32
1.3.1 Основні види технічної діагностики .....	33
1.3.2 Етапи функціональної діагностики .....	34
1.3.3 Загальна характеристика методів функціональної діагностики мета- левих і неметалевих конструкцій та їх елементів .....	36
1.4 Тенденції розвитку систем раннього попередження пошкоджень.....	39
1.5 Огляд виконаних раніше робіт за напрямком досліджень .....	42
1.6 Мета та завдання даних наукових досліджень.....	49
2 ГЕОМЕТРИЧНЕ ТА ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЗЕРВУАРА ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ ЕКОЛОГІЧНО-НЕБЕЗПЕЧНИХ РЕЧОВИН В УМОВАХ ВІТРОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ.....	51



2.1	Аналітичний розрахунок величини вітрового навантаження.....	52
2.2	Розробка діагностичних моделей резервуара.....	59
2.2.1	Основні поняття діагностичного моделювання.....	59
2.2.2	Основні вимоги до розробки геометричних моделей резервуара.....	61
2.2.3	Побудова спрощених моделей.....	65
2.2.4	Побудова ускладнених моделей.....	68
2.3	Оцінка впливу елементів конструкції резервуара на характер розпо- ділу вітрового навантаження.....	73
2.4	Вибір геометричної моделі для подальших досліджень.....	83
2.5	Аналіз вітрового навантаження при різних швидкостях вітру.....	84
	Висновки до розділу 2.....	88
3	РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБІВ ЗАХИСТУ РЕЗЕРВУАРІВ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ ЕКОЛОГІЧНО-НЕБЕЗПЕЧНИХ РЕЧОВИН ВІД ВІТРОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ .....	90
3.1	Загальна характеристика засобів захисту об'єктів від вітрового нава- нтаження.....	90
3.2	Розробка засобу пасивного захисту резервуарів від вітрового наван- таження.....	93
3.2.1	Дослідження ефективності обтічника для резервуара з наземним фу- ндаментом.....	97
3.2.2	Дослідження ефективності обтічника для резервуара з підземним фундаментом.....	105
	Висновки до розділу 3.....	113
4	ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ДІАГНОСТИКИ РЕЗЕРВУАРІВ НА ОСНОВІ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ.....	115
4.1	Загальна структура системи функціональної діагностики резервуарів	115
4.2	Завдання візуалізації даних в системі функціональної діагностики....	121
4.3	Інформаційна модель підсистеми візуалізації даних.....	123
4.4	Розробка алгоритмічного забезпечення для підсистеми візуалізації...	126

4.5	Розробка програмного забезпечення для підсистеми візуалізації.....	129
4.5.1	Середовище програмування Processing.....	129
4.5.2	Написання основного коду програми.....	130
4.5.3	Особливості створення геометричної моделі об'єкта для викорис- тання у підсистемі візуалізації.....	135
4.5.4	Методика перевірки працездатності та результати роботи програми візуалізації на основі імітаційного моделювання.....	139
4.6	Перевірка адекватності імітаційної моделі.....	143
4.6.1	Результати імітаційного моделювання.....	144
4.6.2	Результати фізичного моделювання.....	150
4.7	Візуалізація даних прогнозу росту рівня деформації.....	156
	Висновки до розділу 4.....	162
	ВИСНОВКИ.....	165
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	168
	ДОДАТОК А.....	183
	ДОДАТОК Б.....	185

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ**

ОК	об'єкт контролю
ЕНР	екологічно-небезпечні речовини
ТС	технічний стан
СК	сталеві конструкції
КК	клепані конструкції
МНК	методи неруйнівного контролю
РВС	резервуар вертикальний сталевий
СРП	системи раннього попередження
АЦП	аналогово-цифровий перетворювач

## ВСТУП

Однією з актуальних проблем машинобудування, енергетики, нафтогазової галузі, хімічної промисловості є забезпечення надійної, безаварійної та ефективної експлуатації резервуарів для зберігання екологічно-небезпечних речовин (ЕНР). Пошкодження та руйнування таких об'єктів призводять до забруднення довкілля та несуть загрози для людей, що проживають на прилеглих територіях.

Основним експлуатаційним фактором безпечного функціонування резервуарів є діагностика з метою визначення їх поточного функціонального стану та виявлення пошкоджень. Для діагностики найчастіше використовуються такі методи неруйнівного контролю, як акустична емісія, ультразвукова дефектоскопія, вібраційна діагностика, тощо. Традиційно вдосконалення таких методів та засобів проводиться з метою підвищення точності, чутливості, збільшення швидкодії при виявленні дефектів та пошкоджень.

Але серед резервуарів з ЕНР є такі, що:

- експлуатуються в критичних умовах – у важкодоступних місцях в умовах комплексного впливу навантажень, які часто перевищують розраховані значення;
- характеризуються максимально жорсткими умовами щодо збереження їх цілісності та попередження витoku ЕНР.

Для таких об'єктів важливим є не лише визначення технічного стану (ТС), а попередження появи пошкоджень, що можуть призвести до руйнування елементів конструкції та витoku ЕНР, шляхом оцінки експлуатаційних навантажень, захисту об'єктів від негативного впливу навантажень, прогнозування зміни ТС. Тому актуальною задачею є вдосконалення засобів функціональної діагностики та захисту резервуарів, що експлуатуються в критичних умовах, для забезпечення їх безаварійної експлуатації.

В дисертаційній роботі таку задачу пропонується вирішити на основі імітаційного моделювання, яке на сьогоднішній день є потужним інструментом наукових досліджень та перспективним напрямком розвитку засобів моніторингу

та діагностики складних просторових об'єктів, що знаходяться у важкодоступних місцях під впливом динамічних та кліматичних навантажень.

**Актуальність роботи** полягає в науковому обґрунтуванні та вдосконаленні засобів функціональної діагностики резервуарів на основі імітаційного моделювання шляхом оцінки експлуатаційних навантажень, захисту резервуарів від негативного впливу навантажень, прогнозування зміни ТС для попередження руйнування резервуарів та витоку ЕНР.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційну роботу виконано на кафедрі приладів і систем орієнтації та навігації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» відповідно до держбюджетних науково-дослідних робіт: «Розробка комплексної інтелектуальної системи моніторингу технічного стану конструкцій в експлуатації» (№ДР 0113U000498); «Розробка методичного забезпечення та макетного зразку системи моніторингу на основі концепції Structural Health Monitoring» (№ДР 0115U000318), а також в рамках теми «Розробка автоматизованої системи раннього попередження можливості витоку палива на українській антарктичній станції Академік Вернадський» (№ДР 0111U008931, №ДР 0112U004907, № ДР 0113U004970).

**Мета і задачі дослідження.**

**Метою роботи є обґрунтування та вдосконалення на основі імітаційного моделювання системи функціональної діагностики та засобів захисту резервуарів з екологічно-небезпечними речовинами, які експлуатуються у важкодоступних місцях під впливом природних та техногенних збурень.**

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення наступних задач:

1. Проаналізувати сучасний стан методів та засобів функціональної діагностики резервуарів з ЕНР та обґрунтувати шляхи їх вдосконалення для забезпечення попередження руйнування резервуарів та витоку ЕНР.

2. Виконати геометричне та імітаційне моделювання резервуара в умовах вітрового навантаження та встановити характер і функціональну залежність впливу вітрового навантаження на резервуар.

3. Розробити, теоретично обґрунтувати та дослідити геометричні моделі засобів захисту резервуарів від тиску повітряного потоку, проаналізувати ефективність засобів захисту для резервуарів з наземним та підземним фундаментами.

4. Розробити та обґрунтувати загальну структуру вдосконаленої багатоканальної системи функціональної діагностики резервуарів на основі використання їх моніторингових моделей.

5. На основі імітаційного моделювання розробити підсистему візуалізації для відображення та прогнозування характеристик напружено-деформованого стану, просторового положення та вібраційного стану резервуару в реальних умовах навантажень.

6. Оцінити адекватність використаних імітаційних моделей на основі експериментальних досліджень макета каналу вимірювання вібрації системи діагностики.

7. Впровадити результати досліджень.

*Об'єкт дослідження* – резервуари для зберігання екологічно-небезпечних речовин при критичних умовах експлуатації та засоби їх функціональної діагностики.

*Предмет дослідження* – геометричні та імітаційні моделі резервуарів, вдосконалення засобів функціональної діагностики та захисту резервуарів на основі імітаційного моделювання.

*Методи дослідження* – методи геометричного та імітаційного моделювання складних інженерних об'єктів, методи спектрального та частотно-часового аналізу, методи обробки інформації, методи технічної діагностики, зокрема вібраційний метод вільних коливань, методи прогнозної екстраполяції, методи теорії ймовірності, методи графічного моделювання.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

В дисертації вперше отримано такі нові наукові результати:

- на основі імітаційного моделювання встановлено функціональну залежність впливу вітрового навантаження на резервуар, що дозволяє визна-

чити області безпечної експлуатації, появи пластичних деформацій та потенційного руйнування конструкції резервуара;

- обґрунтовано та розроблено засоби захисту резервуару від вітрового навантаження, визначено їх характеристики для забезпечення зниження на 40% максимального тиску на стінки резервуара;
- для вдосконалення системи функціональної діагностики обґрунтовано та розроблено підсистему візуалізації на основі моніторингових моделей об'єкта для відображення та прогнозування характеристик напружено-деформованого стану, просторового положення та вібраційного стану в реальних умовах навантажень.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Практична цінність дисертаційної роботи полягає в тому, що створено наукові основи практичної реалізації засобу захисту резервуарів та підсистеми візуалізації нової багатоканальної системи функціональної діагностики. Зокрема, розроблено функціональну схему системи діагностики, алгоритмічне та програмне забезпечення для підсистеми візуалізації даних комплексних вимірювань напружень та кутового положення об'єкта, розроблено методику вібраційних вимірювань, алгоритмічне та програмне забезпечення обробки вібраційних сигналів, алгоритмічне та програмне забезпечення прогнозування зміни рівня деформацій, розроблено моделі для використання в функціональних блоках систем моніторингу та діагностики резервуарів для зберігання екологічно-небезпечних речовин, розроблено рекомендації по вибору типу та характеристик захисних засобів від вітрового навантаження для резервуарів з підземним та наземним фундаментом.

### **Особистий внесок здобувача.**

Основні наукові результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Автором самостійно отримано основні положення, які винесені на захист (встановлено функціональну залежність вітрового навантаження на резервуар; визначено області безпечної експлуатації, появи пластичних деформацій та потенційного руйнування конструкції резервуара; обґрунтовано та розроблено засоби захисту резервуару від вітрового навантаження, визначено їх характеристики та

досліджено ефективність; обґрунтовано та розроблено підсистему візуалізації для відображення та прогнозування характеристик напружено-деформованого стану, просторового положення та вібраційного стану в реальних умовах навантажень). Самостійно розроблено імітаційні моделі резервуара, методики їх досліджень, алгоритмічне та програмне забезпечення. За безпосередньою участю автора розроблено методики та проведено експериментальні дослідження макета каналу вимірювання вібрації системи раннього попередження витoku ЕНР.

У роботах, виконаних у співавторстві, особисто автором виконано: [104] – побудовано геометричні моделі резервуара, проведено аналітичний розрахунок та імітаційне моделювання вітрового навантаження на резервуар; [122] – побудовано геометричну модель резервуара, яка відповідає реальній конструкції; [123] – запропоновано концепцію візуалізації даних вимірювань в багатоканальних інформаційно-діагностичних комплексах на основі імітаційного моделювання та систем захвату руху; [132] – побудовано геометричну модель резервуара, проведено модальний аналіз та написано алгоритми завантаження та перетворення даних, а також формування скорегованих векторів даних для програми обробки сигналів вібрації; [113] – проаналізовано результати імітаційного моделювання вітрового навантаження на резервуар в умовах використання засобів пасивного захисту від вітрового навантаження; [129] – написано алгоритми завантаження даних та тривимірної моделі, а також відображення даних тензометричних вимірювань на тривимірній моделі; [130] – написано алгоритми завантаження та перетворення даних, а також формування скорегованих векторів даних для програми обробки сигналів вібрації; [124] – обґрунтовано принципи роботи пристрою графічного відображення результатів; [131] – проведено теоретичне обґрунтування способу вимірювання малих лінійних переміщень; [125] – обґрунтовано принципи роботи системи; [98] – описано характер вітрового навантаження на резервуар в умовах Антарктики; [134] – проведено модальний аналіз резервуара; [135] – проведено порівняння методів обробки сигналів вібрації; [97] – проведено огляд тривимірних моделей вертикального сталевих резервуарів, а також проблем, які виникли в процесі їх побудови; [99] – побудовано три геометричні моделі верти-



кального сталевих резервуара; [100] – створено ряд тривимірних моделей резервуара різної складності; [101] – проведено оптимізацію геометричних моделей резервуара для коректної побудови скінчено-елементної сітки; [102] – проведено імітаційне моделювання для вибору найбільш оптимальної геометричної моделі резервуара з метою її використання у одному з блоків автоматизованої системи діагностики; [109] – показано, що неправильно підібрані параметри засобу пасивного захисту від вітрового навантаження призводять до появи додаткових динамічних збурень у вигляді вібрації.

### **Апробація результатів дисертації.**

Основні положення і результати роботи доповідались та обговорювались на таких конференціях та семінарах:

- IV науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування», м. Київ, 2011р.
- X міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2011: стан і перспективи», м. Київ, 2011р.
- XIV міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Екологія. Людина. Суспільство», м. Київ, 2011р.
- 3-тя науково-практична конференція студентів і молодих учених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання», м. Івано-Франківськ, 2011р.
- V науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування», м. Київ, 2012р.
- Первая Всеукраинская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные тенденции развития приборостроения», г. Луганск 2012г.
- VI міжнародна Антарктична конференція «Інтернаціоналізація досліджень в Антарктиці – шлях до духовної єдності людства», м. Київ, 2013р.

- 4-та науково-практична конференція студентів і молодих учених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання», м. Івано-Франківськ, 2013р.
- XIII міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи», м. Київ, 2014р.
- VII міжнародна Антарктична конференція «Антарктичні дослідження: нові горизонти та пріоритети», м. Київ, 2015р.
- XIV міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи», м. Київ, 2015р.
- IV міжнародна науково-технічна конференція «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування», м. Тернопіль, 2015р.

Проміжні результати роботи доповідались на наукових семінарах кафедри приладів і систем орієнтації і навігації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

### **Публікації.**

За темою дисертаційних досліджень опубліковано 26 наукових праць, у тому числі 6 статей у фахових виданнях, з них 5 у виданнях, що входять до науко-метричних баз даних, 3 патенти України на корисну модель, 14 матеріалів та тез доповідей на науково-технічних конференціях, 2 свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір, 1 стаття в інших виданнях.

**Структура й обсяг дисертації.** Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, переліку посилань зі 135 назв. Загальний обсяг дисертації становить 186 сторінок, обсяг основної частини становить 157 сторінок, 78 рисунків, 6 таблиць та 2 додатки на 4 сторінках.

## РОЗДІЛ 1

### ПРОБЛЕМА ОЦІНКИ ПОТОЧНОГО ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ОБ'ЄКТІВ З ЕКОЛОГІЧНО-НЕБЕЗПЕЧНИМИ РЕЧОВИНАМИ

#### 1.1 Загальна характеристика об'єктів для зберігання екологічно-небезпечних речовин

Об'єкти для зберігання екологічно-небезпечних речовин (ЕНР) – це спеціально обладнані інженерні або будівельні споруди, які облаштовані відповідно до законодавства та нормативно-правових актів у сфері екологічної безпеки та безпеки людей. Вони, як правило, призначені для довгострокового зберігання з метою подальшого знешкодження, утилізації, захоронення, використання наступних видів ЕНР [1]:

- легкозаймистих речовин – газів, які при нормальному тиску і в суміші з повітрям стають легкозаймистими і температура кипіння яких при нормальному тиску становить 20 °С або нижче;
- окислюючих речовин – речовин, що підтримують горіння, викликають займання та/або сприяють займанню інших речовин у результаті окислювально-відновної екзотермічної реакції;
- горючих речовин – рідин, газів, що здатні самозайматися, а також займатися від джерела запалювання та самостійно горіти після його видалення;
- вибухових речовин – речовин, які при певних видах зовнішньої дії здатні на дуже швидке хімічне перетворення, що саморозповсюджується з виділенням тепла і утворенням газів;
- токсичних та високотоксичних речовин – речовин, які здатні при впливі на живі організми призводити до їх загибелі;
- інших речовин, які становлять небезпеку для навколишнього середовища або життя людей.

Вимоги до об'єктів зберігання встановлюються екологічними, санітарними, протипожежними та іншими нормами і правилами, згідно з якими місце і спосіб зберігання ЕНР повинні забезпечити [2]:

- відсутність або мінімізацію впливу ЕНР на навколишнє природне середовище;
- відсутність ризику виникнення небезпеки для здоров'я людей в результаті локального впливу ЕНР;
- недоступність ЕНР для сторонніх осіб;
- зведення до мінімуму ризику займання ЕНР;
- зручність здійснення контролю за технічним станом (ТС) об'єкта, що містить ЕНР.

Попередження витоку ЕНР має забезпечуватися:

- контролем цілісності та загального ТС об'єктів для зберігання;
- відповідністю зовнішніх збурень на об'єкт, які враховані при його проектному розрахунку;
- захистом об'єкта від зовнішніх впливів, значення (сила, характер дії, тощо) яких не враховані або перевищують проектні.

### **1.1.1 Класифікація об'єктів для зберігання екологічно-небезпечних речовин**

Інженерні та будівельні конструкції дуже різноманітні за своїм призначенням і застосуванням (в залежності від виду ЕНР, що зберігається), проте їх можна об'єднати за деякими ознаками спільності тих або інших властивостей. У [3] запропонована наступна класифікація таких об'єктів:

- 1) За геометричною ознакою конструкції прийнято розділяти на масиви, бруси, плити, оболонки і стрижневі системи.
- 2) З точки зору статички конструкції діляться на статично визначені та статично невизначені. До перших відносяться системи (конструкції), зусилля або

напруги в яких можуть бути визначені тільки з рівнянь статички (рівнянь рівноваги), до других – такі, для яких одних рівнянь статички недостатньо.

3) За різноманіттям використовуваних матеріалів елементи конструкцій поділяються на: металеві, дерев'яні, пластмасові, залізобетонні, бетонні, кам'яні або цегляні.

4) З точки зору напружено-деформованого стану, тобто внутрішніх зусиль, що виникають у конструкціях, напружень і деформацій під дією зовнішнього навантаження, умовно можна поділити їх на три групи: найпростіші, прості і складні. Такий поділ не є загальноприйнятим, але дозволяє систематизувати характеристики видів напружено-деформованих станів конструкцій, які широко поширені в будівельній практиці.

### **1.1.2 Матеріали конструкції об'єктів з екологічно-небезпечними речовинами**

Будівельна практика має справу з великою номенклатурою матеріалів, як конструкційних, так і теплоізоляційних та оздоблювальних. Як зазначено вище, найбільш поширеними в якості конструкційних матеріалів (тобто матеріалів, які застосовуються для несучих конструкцій або їх елементів) є метал, деревина, пластмаса, залізобетон, камінь або цегла. Не зупиняючись на особливостях роботи різних матеріалів під навантаженням і впливу на них умов експлуатації, на відмінності їх хімічного складу, структури та інших факторів, розглянемо деякі рекомендації щодо їх застосування [3-18].

Вибір матеріалів для несучих конструкцій об'єктів для зберігання/утримання ЕНР залежить від багатьох умов: капітальності, довговічності, економічності та інших. При цьому немає необхідності кожного разу виконувати порівняння варіантів і економічні обґрунтування, тому що в будівельній практиці за певними видами конструкцій давно закріпилися відповідні матеріали. Більш того, деякі матеріали не тільки недоцільно, але й неможливо використати для ряду конструкцій. Наприклад, сталь, залізобетон, деревину можна використовувати

для конструкцій, що працюють на стиск і згинання (колони і балки), а камінь (цегла) широко використовується для стовпів, але практично не використовується для конструкцій, що працюють на згинання. Далеко не всі матеріали можна застосовувати для елементів, що працюють на розтяг і так далі.

Сталеві конструкції (СК) – конструкції, елементи яких виготовлені зі сталі й з'єднані зварюванням, заклепками або болтами. Завдяки високій міцності сталі СК надійні в експлуатації, мають малу масу й невеликі габарити в порівнянні з конструкціями з інших матеріалів. СК відрізняються різноманіттям конструктивних форм й архітектурною виразністю. Виготовлення й монтаж СК здійснюють індустріальними методами. Основний недолік СК – схильність до корозії, що вимагає періодичного проведення захисних заходів (тобто застосування спеціальних покриттів і фарбування), які підвищують витрати по експлуатації. У сучасному будівництві СК застосовують переважно як несучі конструкції в різних (за призначенням й конструкцією) будівлях і спорудах (у тому числі в об'єктах для зберігання/утримання ЕНР).

Зварні конструкції – металеві конструкції будівель і споруд, з'єднання елементів яких виконані зварюванням. У вигляді зварних конструкцій виготовляється приблизно 95 % сучасних сталевих конструкцій, серед яких особливо ефективні листові конструкції. Зварні конструкції мають ряд переваг перед клепаними, основні з них: економія металу (до 25 %) у результаті більш повного використання перерізу й меншої ваги сполучних елементів, менша вартість (завдяки застосуванню відносно недорогого обладнання), щільність (герметичність зварювальних швів).

Клепані конструкції (КК) – металеві конструкції, елементи яких з'єднуються заклепками. Сучасні металеві конструкції виготовляються головним чином зварними; отвори для заклепок, що послабляють перерізи КК від 15 % до 20 %, а також трудомісткість виготовлення КК роблять їх у більшості випадків менш вигідними в порівнянні зі зварними конструкціями. Однак КК більш надійні в умовах низьких температур, коли концентрації напружень, що сприяють виникненню крихкого руйнування конструкцій і напруження, що розвиваються в

місцях отворів для заклепок, істотно менше концентрацій у зварних швах. Тому КК нерідко застосовують при зведенні споруд у північних районах. КК застосовуються також при будівництві об'єктів з великими навантаженнями, коли можливість руйнування металу під дією циклічних навантажень є особливо небезпечною або виготовлення шляхом зварювання потужного складеного перерізу елемента супроводжується значними технологічними труднощами.

Деревина є одним з найдавніших будівельних матеріалів та має ряд цінних властивостей: простота заготівлі та обробки, високі теплотехнічні властивості, висока стійкість до більшості видів хімічної агресії, можливість склеювання маломірних дошок та фанери. Деревина та вироби з неї мають порівняно високі показники міцності при невеликій вазі. У сучасному будівництві високоякісні, довговічні й економічні дерев'яні деталі застосовуються в якості другорядних елементів об'єктів для зберігання ЕНР.

До пластмас відносяться численні штучні матеріали, об'єднані за спільною ознакою, – в їх основі лежить синтетичний полімер, що називається сполучним, смолою або просто полімером. До складу пластмас крім полімеру входять також наповнювачі, пластифікатори, стабілізатори, барвники та ін.

У будівництві інженерних та будівельних конструкцій (у тому ж числі об'єктів для зберігання/утримання ЕНР) найбільше застосування знайшли склопластики і деревні пластики. У склопластиках наповнювачем служить скловолокно, а в деревних пластиках – продукти переробки натуральної деревини. Смола (сполучна) захищає наповнювач від впливу зовнішнього середовища і сприяє рівномірному розподілу зусиль у пластмасі.

В якості огорожувальних конструкцій з листових склопластиків найбільше застосування знайшли плоскі і хвилясті поліефірні склопластики. Ці матеріали мають задовільні фізико-механічні властивості, невелику об'ємну вагу, світлопрозорість і гарний зовнішній вигляд. Склопластики застосовують і в несучих конструкціях. Погонажні вироби можуть виходити практично будь-якого поперечного перерізу і будь-якої довжини. Їх доцільно застосовувати в спорудах, які

схильні до дії агресивних середовищ, а також в «радіопрозорих», немагнітних, електроізоляційних та інших спорудах спеціального призначення.

Практична можливість застосування несучих конструкцій з пластмас у різних областях будівництва підтверджена численними прикладами споруд у багатьох країнах світу [4].

Найбільш ефективними конструкціями із пластмас є просторові конструкції у вигляді оболонок покриття, в яких завдяки раціональній геометричній формі в значній мірі компенсується такий недолік пластмас, як підвищена деформативність внаслідок відносно низького модуля пружності.

В якості ефективного теплоізоляційного матеріалу застосовуються спінені полімери, так звані пінопласти. Завдяки низькій масі, низькій теплопровідності і відносно достатній міцності вони використовуються в плитах, панелях покриттів і стін (у тому числі міжстінного простору конструкцій для зберігання/утримання ЕНР) об'єктів різного призначення, що відрізняються легкістю і високими теплозахисними властивостями.

Камінь має переваги перед іншими матеріалами тому, що є одночасно несучим, теплоізоляційним і оздоблювальним матеріалом і в той же час задовольняє вимогам пожежної безпеки, міцності, морозостійкості, теплопровідності, водо- і повітряної стійкості, водопоглинання, стійкості в агресивному середовищі, має певну форму, розміри й фактуру лицьової поверхні.

Залізобетон, особливо збірний, у вітчизняній будівельній практиці має широке поширення, застосовується нарівні зі сталлю, за винятком тих областей, де його використання недоцільне або неможливе.

Залізобетон отримав широке поширення в будівництві об'єктів з ЕНР завдяки його властивостям:

- можливості надавати йому будь-які доцільні конструктивні та архітектурні форми;
- довговічності (залізобетон у порівнянні з іншими будівельними матеріалами більш довговічний, так як міцність бетону з часом зростає, а



сталь, надійно захищена бетоном, не змінює своїх властивостей протягом усього періоду експлуатації споруди);

- хорошому опору атмосферним впливам і дії вогню, дії сейсмічних і динамічних навантажень;
- низькому рівню експлуатаційних витрат з утримання споруд та догляду за залізобетонними конструкціями;
- порівняно невисокому рівню капітальних витрат на організацію виробництва, так як основну масу залізобетону складають місцеві матеріали (пісок, гравій або щебінь, вода).

До недоліків залізобетону відносяться: велика власна вага, висока тепло- та звукопровідність, можливість появи тріщин і відшарування, складність проведення робіт у зимовий період, труднощі обробки та переробки.

У різних промислових та інженерних спорудах із залізобетону з метою захисту від фільтрації рідин, газопроникнення і радіоактивних випромінювань, а також від механічних пошкоджень по поверхні бетону проводиться облицювання сталевими листами. До таких споруд відносяться надземні і підземні резервуари і різні ємності, технологічні і транспортні тунелі, насосні станції, опускні колодязі, захисні оболонки атомних станцій, підводні чи плавучі конструкції та інші.

### **1.1.3 Фактори, які впливають на зниження несучої здатності об'єктів для зберігання екологічно-небезпечних речовин**

Технічний стан інженерних та будівельних конструкцій у цілому є функцією працездатності окремих конструктивних елементів і з'єднань між ними. Поява дефектів і пошкоджень несучих конструкцій обумовлює зниження несучої здатності об'єктів з ЕНР, що може призвести до руйнування об'єкта.

Уся сукупність причин, що викликають зниження несучої здатності об'єктів для зберігання/утримання ЕНР у цілому і окремих елементів, може бути умовно розділена на дві групи – внутрішнього і зовнішнього характеру [12].

До причин внутрішнього характеру відносять якість проектування, виготовлення і монтажу, фізико-хімічні процеси, що протікають в матеріалах, навантаження і процеси, що виникають при експлуатації.

До причин зовнішнього характеру відносять кліматичні впливи (температуру, вологість, сонячну радіацію), фактори навколишнього середовища (вітер, пил, пісок, наявність в атмосфері агресивних сполучень, біологічні фактори), а також умови експлуатації.

Дефекти проектування, як правило, пов'язані з нераціональними або помилковими конструктивними рішеннями, невідповідністю розрахункової схеми дійсним умовам роботи, відхиленнями від норм проектування та іншими причинами.

Дефекти виготовлення визначаються відхиленнями від проектних геометричних розмірів, зниженням міцності і підвищенням проникності матеріалу в порівнянні з проектними, порушеннями армування, товщини захисного шару, наявністю тріщин, раковин, каверн в зварних з'єднаннях.

Дефекти монтажу і зведення проявляються в зсувах конструкцій від проектного положення, недостатній площі обпирання, низькій якості монтажних з'єднань, неякісному виконанні антикорозійного захисту, гідроізоляції і так далі.

Порушення правил експлуатації часто веде до механічних пошкоджень несучих конструкцій. Тут слід зазначити необґрунтовані дії експлуатаційного персоналу, що практикуються в усьому світі, пов'язані з пробиванням отворів, прорізів, оголенням і вирізкою арматури, ударами при переміщенні вантажів чи устаткування та інші.

Конструктивно-технологічні пошкодження та дефекти споруд викликаються двома групами причин:

- перевантаженнями конструкцій зовнішніми або внутрішніми зусиллями і перерозподілом навантажень у загальній системі споруди;
- фізичним зносом матеріалів конструкцій.

Дія навколишнього середовища і кліматичних факторів сприяє появі дефектів і пошкоджень, таких як корозійне руйнування бетону, утворення тріщин уз-

довж арматурних стержнів, у результаті чого оголюється арматура і збільшується інтенсивність корозії. Сезонні коливання температури викликають руйнування цегли та бетону, лакофарбових покриттів металевих конструкцій, що призводить до значного зниження експлуатаційних якостей. Невдале конструювання вузлів і стиків у багатьох випадках призводить до прискореного корозійного руйнування внаслідок утворення застійних зон, нещільності в зварних і болтових з'єднаннях. Вплив зовнішніх факторів на довговічність конструкцій настільки різноманітний, що вимагає ретельного аналізу кожного з виявлених при обстеженні дефекту або пошкодження.

**Класифікація основних зовнішніх збурень.** На визначення ТС об'єктів для зберігання ЕНР впливає безліч факторів, які призводять до зниження несучої здатності і експлуатаційної придатності конструкцій. У діючих нормативних документах [19, 20] усі навантаження та впливи поділяються на механічні та немеханічні.

Механічні впливи враховуються в розрахунку безпосередньо та розглядаються як сукупність сил, прикладених до конструкції, або як вимушені переміщення і деформації елементів конструкції. З іншого боку, впливи немеханічної природи (наприклад, впливи агресивного середовища), як правило, враховуються в розрахунку опосередковано.

У залежності від тривалості неперервної дії змінні навантаження і впливи поділяються на [19, 20]:

1. Постійні навантаження:

- вага частин будівель та споруд, у тому числі вага несучих та огорожувальних конструкцій;
- вага та тиск ґрунтів (насипів, засипок), гірничий тиск;
- гідростатичний тиск;
- зусилля від попереднього напруження, що зберігаються у конструкції чи в основі.

2. Змінні тривалі навантаження:

- вага тимчасових перегородок, підливок та підбетонки під обладнання;

- вага стаціонарного обладнання;
- тиск газів, рідин та сипучих тіл у резервуарах для зберігання ЕНР та трубопроводах, надлишковий тиск;
- впливи, обумовлені деформаціями основи, які не супроводжуються докорінною зміною структури ґрунту;
- впливи, обумовлені зміною вологості, компонентів агресивного середовища, усадкою і повзучістю матеріалів.

### 3. Змінні короткочасні навантаження:

- вага людей, ремонтних матеріалів у зонах обслуговування та ремонту устаткування з граничними чи експлуатаційними розрахунковими значеннями;
- снігові навантаження з граничними чи експлуатаційними розрахунковими значеннями;
- температурні кліматичні впливи з граничними чи експлуатаційними розрахунковими значеннями;
- вітрові навантаження з граничними чи експлуатаційними розрахунковими значеннями;
- ожеледні навантаження з граничними чи експлуатаційними розрахунковими значеннями.

### 4. Епізодичні навантаження:

- сейсмічні впливи;
- вибухові впливи;
- впливи, обумовлені деформаціями основи, які супроводжуються докорінною зміною структури ґрунту (при замочуванні просадкових ґрунтів) або його осіданням у районах гірничих виробок і в карстових районах;
- навантаження, зумовлені пожежею;

Враховуючи різноманітність навантажень, що діють на елементи конструкції об'єктів для зберігання ЕНР, їх ТС з часом зазнає значних змін. Для більшо-

сті конструкцій оцінка ТС проводиться згідно з нормативними документами [21-26], переважно це візуальне експертне обстеження.

ТС елементів конструкцій є характеристикою, що показує здатність розглянутого об'єкта виконувати передбачені для нього завдання в межах граничних умов, що характеризуються набором граничних станів за фізичними і хімічними характеристиками, до яких, в основному, відносяться:

- здатність конструкцій і споруд відповідати своєму цільовому призначенню при вертикальних, горизонтальних і комбінованих навантаженнях, які в свою чергу поділяються на статичні і динамічні;
- здатність конструкцій зберігати цілісність і незмінність положення в просторі, зберігаючи цільову функціональність при впливі фізичних факторів (перепадів температур і т.п.);
- здатність конструкцій зберігати цілісність і незмінність положення в просторі при впливі хімічних факторів.

Для підвищення надійності та забезпечення безпечної експлуатації об'єктів з ЕНР необхідною є оцінка їх ТС та прогнозування його зміни в майбутньому.

## **1.2 Резервуари для зберігання екологічно-небезпечних речовин**

У наш час для зберігання нафти і нафтопродуктів, як одного із видів ЕНР, широко розповсюджені резервуарні парки, які є складними інженерно-технічними спорудами і складаються з резервуарів, як правило, об'єднаних у групи. Загалом для зберігання ЕНР у вітчизняній практиці застосовуються резервуари металеві, залізобетонні, з синтетичних матеріалів, льодоґрунтові. Найбільш поширені, як у нас у країні, так і за кордоном, зварні сталеві резервуари наступних типів [27]:

- циліндричні резервуари вертикальні сталеві (РВС) зі стаціонарним конічним або сферичним дахом місткістю до 50000 м<sup>3</sup>;
- циліндричні РВС зі стаціонарним дахом і плаваючим понтоном місткістю до 50000 м<sup>3</sup>;

- циліндричні РВС з плаваючим дахом місткістю до 120000 м<sup>3</sup>.

У таких конструкціях верхній зварний шов з дахом резервуара виконується ослабленим з метою запобігання руйнування при вибуху пароповітряної суміші всередині замкнутого обсягу резервуара.

Для зберігання відносно невеликих кількостей ЕНР можуть застосовуватися горизонтальні сталеві резервуари ємністю до 1000 м<sup>3</sup>. Крім сталевих резервуарів у ряді випадків застосовуються також залізобетонні.

У залежності від призначення резервуари поділяються на дві групи:

- для зберігання рідин при надмірному тиску до 0,07 МПа включно і температурі до 120 °С;
- для зберігання рідин під тиском понад 0,07 МПа.

Резервуари можуть установлюватися підземно або наземно. До підземних відносяться резервуари, заглиблені в ґрунт або обсіпані ґрунтом, коли:

- найвищий рівень речовини, що зберігається в ньому, знаходиться не менше ніж на 0,2 м нижче мінімальної планової мітки прилеглої площадки;
- обсіпання не менше ніж на 0,2 м вище допустимого рівня ЕНР у резервуарі і шириною не менше 3 м.

Наземними є резервуари, у яких днище знаходиться на одному рівні або вище мінімальної планової мітки прилеглої площадки в межах 3 м від стінки резервуара. У районах Крайньої Півночі з вічною мерзлотою, на скельних породах, тощо практикується також установка резервуарів на пальових підставах.

Усі резервуари обладнуються дихальною арматурою/клапанами для вирівнювання тиску всередині резервуара з навколишнім середовищем при закачуванні або відкачці ЕНР, приймально-відпускними пристроями, а при необхідності, особливо при зберіганні нафти і темних нафтопродуктів, системами розмиву донних відкладень. Вентиляційні патрубки на резервуарах для ЕНР з температурою спалаху менше 120 °С обладнуються вогневими перегородками.

Приймально-відпускні пристрої резервуарів для зберігання ЕНР можуть бути різної конфігурації. У першому випадку [27] приймально-відпускний при-

стрій складається з приймально-відпускного патрубку, хлопуші, механізму управління хлопушею, який включає лебідку і трос, перепускний пристрій і підвідний трубопровід. У другому випадку замість хлопуші є підйомна труба, яка є продовженням приймально-відпускного патрубку і з'єднана з останнім за допомогою шарніра.

Хлопуша являє собою металеву заслінку, установлену на приймально-відпускному патрубку. Заслінка кріпиться на шарнірі і перекриває патрубок під дією власної маси. Відкриття заслінки відбувається або під тиском рідини, що закачується, або за допомогою механізму управління. Механізм управління хлопушею складається з троса і лебідки, яка може мати ручний привід для трубопроводів малих діаметрів (до 350 мм) або електричний у вибухобезпечному виконанні для трубопроводів діаметром понад 350 мм. Тиск відкривання заслінки хлопуші визначається вагою самої заслінки і гідростатичним тиском стовпа рідини в резервуарі. Центр осі механізму управління хлопушею розташовується зазвичай на 900 мм вище осі приймально-відпускного патрубку, на якому кріпиться хлопуша.

Резервуари, призначені для зберігання в'язких ЕНР, часто обладнуються системами обігріву та покриваються теплоізоляційним негорючим матеріалом. В якості теплоізоляційних матеріалів можуть застосовуватися цегла, азбоцемент, шлаковата, піноскло. Підігрів ЕНР у резервуарах за допомогою внутрішніх обігрівачів проводиться насиченою парою або гарячою водою.

На дахах резервуарів крім дихальної арматури/клапанів розміщуються також світлові та технологічні люки для проведення замірів і технічного обслуговування, а на плаваючих дахах, крім того, пристрої для видалення атмосферних опадів через гнучкий шланг або шарнірну трубу і рухомі сходи.

Таким чином, РВС є складною інженерно-будівельною конструкцією з великою кількістю допоміжних елементів, які можуть прямо чи опосередковано впливати на технічний стан конструкції в цілому. Існує безліч причин втрати несучої здатності резервуарів, тому для забезпечення безаварійної експлуатації даних об'єктів доцільно розглянути основні з них.

### 1.2.1 Основні причини втрати несучої здатності резервуарів

Класичні методи розрахунку елементів конструкцій на міцність ґрунтуються на припущеннях, що протягом усього терміну експлуатації в матеріалі відсутні макроскопічні дефекти, які можуть призвести до руйнування конструкції [28]. Але такий підхід є недостатнім при розв'язанні проблем забезпечення безпечної експлуатації об'єктів з початковими дефектами в їх конструктивних елементах. Дефекти та пошкодження в елементах конструкцій РВС виникають як внаслідок технологічних та виробничих факторів, так і в процесі експлуатації споруди під впливом неконтрольованих збурень техногенного та/або природного походження.

В якості основних можна виділити сейсмічні та вітрові навантаження на РВС з ЕНР. Серед інших чинників пошкоджень і аварій варто розглянути наступні:

- різкі зміни температури стінок резервуара при коливанні рівня ЕНР;
- корозія металу за різними механізмами, у тому числі корозійне розтріскування під напругою;
- втомні процеси в основному металі і в зварних з'єднаннях;
- наявність зон концентрації високих напружень після монтажних і зварювальних робіт;
- незадовільна якість зварних з'єднань (особливо монтажних) і металопрокату стінки;
- деформація опор і фундаментів;
- тривалий термін експлуатації без контролю ТС та ремонту.

Зазначені вище чинники у процесі експлуатації резервуарів для зберігання ЕНР можуть призвести до таких основних видів пошкоджень і дефектів:

- недопустима корозія металу;
- старіння металу;
- тріщини різної природи;
- розшарування основного металу;



- деформаційна зміна геометрії;
- локальна втрата стійкості металу.

На рис. 1.1 та рис. 1.2 показано результат впливу зовнішніх збурень на РВС [29]. Дія сейсмічних, вітрових навантажень та дефекти установки призвели до деформування стінки та обвалу даху (рис. 1.1). На рис. 1.1 також зображено недопустиму корозію металу, яку за допомогою системи раннього попередження (СРП), як одного з видів системи функціональної діагностики, можна було б зареєструвати на ранніх стадіях розвитку та уникнути пошкодження конструкції. На рис. 1.2 видно, як під дією перепаду тиску деформувалися стінки РВС, що в подальшому може призвести до руйнування всієї конструкції.

Знання природи, джерел та характеру впливу зовнішніх і внутрішніх збурень, а також їх наслідків дає можливість визначити необхідні діагностичні параметри, а також встановити такі їх значення, перевищення яких у процесі експлуатації резервуарів свідчатиме про зміну їх ТС.



а)

а) обвал даху;



б)

б) корозія резервуара.

Рисунок 1.1 – вплив зовнішніх збурень на резервуари

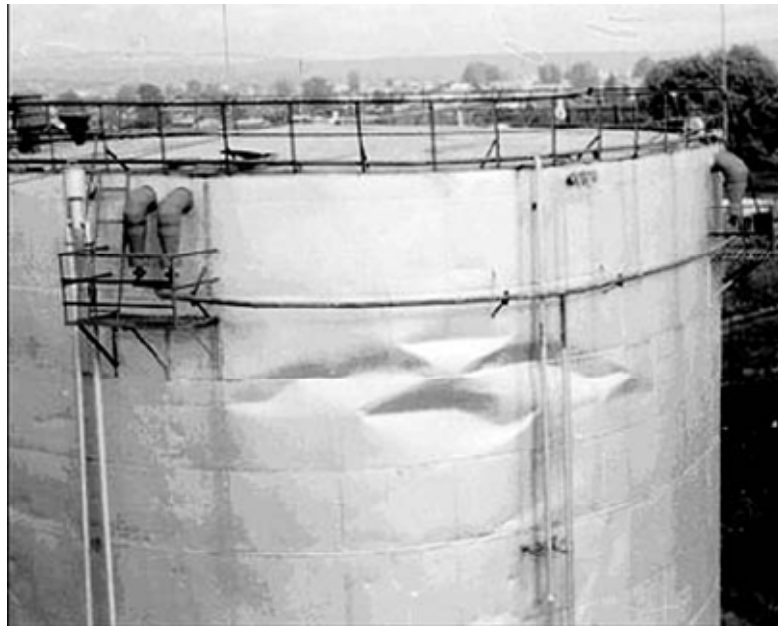


Рисунок 1.2 – Деформація стінки під дією перепаду тиску

Використання резервуарів не обмежується лише якоюсь однією галуззю, а розповсюджено в промисловості [30]:

- сільськогосподарській – для зберігання зерна, насіння, технічних вод, масла та інших відходів;
- целюлозно-паперовій – при виробництві паперу та переробці деревини необхідні резервуари для запасів води та палива, дренажу технічних вод;
- будівельній – для забезпечення робітників чистою водою, а процесів будівництва – технологічною;
- харчовій – для зберігання води, молока, молочних продуктів та інших рідин;
- нафтогазовій – на всіх етапах видобутку та переробки нафти та газу;
- гірничодобувній – у процесі розробки гірської породи необхідна велика кількість води, яку необхідно зберігати і транспортувати в важкодоступні ділянки, а також збирати вже використану воду в спеціальних відстійниках;
- хімічній – для зберігання та транспортування хімічних речовин, зріджених газів та будь-яких інертних речовин;

- енергетичний – для зберігання палива та технічної води.

На сучасному етапі проблеми зберігання ЕНР виходять за рамки національних кордонів і мають глобальний характер, так як деяка частина об'єктів знаходяться поза межами дії національної юрисдикції в тому числі в таких важкодоступних місцях як Світовий океан, Антарктика, тощо.

До таких об'єктів відноситься РВС циліндричної форми для зберігання дизельного палива (рис. 1.3), який на початку 2007 року було встановлено та запущено в експлуатацію на українській антарктичній станції Академік Вернадський [31]. Для такого об'єкта контролю (ОК) характерними особливостями є важкодоступність, критичні кліматичні умови, значні динамічні збурення у вигляді вітрових та сейсмічних навантажень.



а)

а) внутрішня місткість



б)

б) зовнішня (захисна) оболонка

Рисунок 1.3 – Циліндричний зварний РВС

Резервуар об'ємом  $200 \text{ м}^3$  запроектований двоштінним (наявність внутрішньої та зовнішньої захисної оболонок), з двома днищами і дахами з урахуванням нових напрямків у будівництві резервуарів з метою підвищення їх експлуатаційної і аварійної безпеки. Проте через ризик виникнення надзвичайних ситуацій під дією комплексу динамічних та кліматичних навантажень (рис. 1.4, табл. 1.1) існує ймовірність витоку палива з резервуара або трубопроводів, що, у зале-

жності від масштабів, може призвести до погіршення екологічного стану поблизу станції або екологічної катастрофи.

Таблиця 1.1 – Кліматичні умови майданчика будівництва

Майданчик будівництва	Антарктида
Нормативне значення ваги снігового покриву	50 кгс/м <sup>2</sup>
Нормативне значення вітрового тиску	123,5 кгс/м <sup>2</sup>
Максимальна зимня температура зовнішнього повітря	– 30 °C
Максимальна літня температура зовнішнього повітря	+ 20 °C

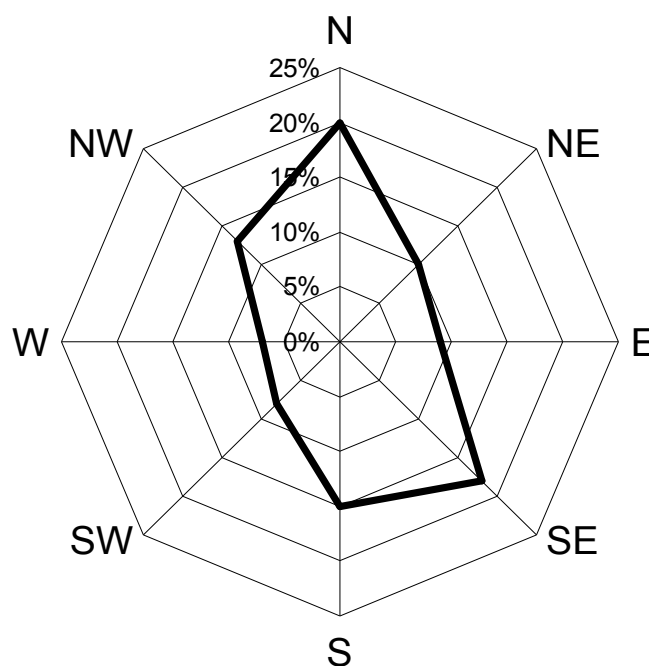


Рисунок 1.4 – Роза вітрів за 2010-й рік

Таким чином зазначений об'єкт уособлює з одного боку найбільш жорсткі вимоги до забезпечення безпечної експлуатації РВС, а з іншого – найбільш несприятливі, критичні умови експлуатації та можливості моніторингу його ТС. Тому забезпечення безпечної експлуатації резервуарів з ЕНР, які знаходяться у важкодоступних місцях та під дією навантажень природного та/або техногенного

походження, у тому числі й на українській антарктичній станції Академік Вернадський, є важливою та актуальною проблемою.

### **1.2.2 Загальна характеристика проблеми зберігання екологічно-небезпечних речовин на території Антарктики**

Міжнародні договори є головним джерелом міжнародного права. В Україні вони є частиною національного законодавства і застосовуються у порядку, передбаченому для норм національного законодавства (ст.19.1 Закону України «Про міжнародні договори України» від 29 червня 2004 року). Якщо міжнародним договором України, який набрав чинності в установленому порядку, встановлено інші правила, ніж ті, що передбачені у відповідному акті законодавства України, то застосовуються правила міжнародного договору (ст.19.2 Закону України «Про міжнародні договори України» від 29 червня 2004 року). Україна також є стороною близько 70 міжнародно-правових актів універсального (глобального), регіонального та двостороннього характеру [32].

Основним міжнародно-правовим актом, що регулює забезпечення наукових досліджень та забезпечення миру на континенті, є Договір про Антарктику [33], який передбачає демілітаризацію району Антарктики, його використання виключно в мирних цілях, зокрема для наукової діяльності, і перетворення на зону, вільну від ядерної зброї. Дія договору поширюється на всю територію на південь від 60 градусів південної широти, включаючи всі шельфові льодовики.

Система Договору про Антарктику включає низку прийнятих рекомендацій, угод, конвенцій та інших міжнародних правових документів, що уточнюють та доповнюють Договір [34], серед яких слід згадати наступні: Конвенція про збереження живих морських ресурсів Антарктики [35] та Протокол про охорону навколишнього середовища до Договору про Антарктику [36].

3 листопада 2010 року Кабінетом Міністрів України прийнято Постанову №1002 «Про затвердження Державної цільової науково-технічної програми проведення досліджень в Антарктиці на 2011–2020 роки» [37]. Прийняття Постанови

Кабінетом Міністрів України відкриває нашим вченим новий простір для наукових розвідок і подальшої інтеграції до міжнародного загону лідерів освоєння Льодового континенту та сприятиме виконанню Україною міжнародних зобов'язань у рамках Договору про Антарктику 1959 року.

За напрямом Розробка і впровадження нових технологій Програма досліджень в Антарктиці передбачає розробку і впровадження: інформаційних систем і технологій для автоматизованого збору, збереження, обробки результатів наукових спостережень в Антарктиці та передачі даних і результатів їх обробки; автоматизованої СРП витоку палива та додаткового захисту навколишнього середовища Антарктики; запозичення досвіду впровадження сучасних технологій на антарктичних станціях інших Сторін Договору про Антарктику [38].

Усе зазначене підкреслює актуальність розробки і впровадження СРП зміни поточного та прогнозного ТС для забезпечення безпечної експлуатації об'єктів, які знаходяться у складних умовах функціонування, зокрема на антарктичній станції Академік Вернадський.

### **1.3 Шляхи попередження витоку екологічно-небезпечних речовин та втрати несучої здатності резервуарів**

Як зазначено вище, забезпечення безпечної експлуатації ОК, що перебуває у складних умовах експлуатації, шляхом визначення його ТС є важливою та актуальною задачею. Це безпосередньо пов'язано з потребою запобігання виникнення аварійних ситуацій, які можуть завдати не тільки економічний чи екологічний збиток, але й привести до людських жертв у разі втрати несучої здатності ОК через появу та розвиток в ньому дефектів і пошкоджень.

З урахуванням важкодоступності ОК та подібних об'єктів, які знаходяться у критичних умовах експлуатації, необхідно виробити новий підхід до його технічного обслуговування. На заміну системи планово-попереджувальних робіт (наприклад, [24, 25]), що включає в себе періодичний інструментальний та/або візуальний контроль елементів конструкції і профілактичний ремонт, більш до-

цільним стає обслуговування ОК за його фактичним станом, тобто проведення ремонту відбувається тільки у разі його реальної необхідності.

Для вирішення цього завдання потрібно використовувати методи і засоби діагностики, що дозволяють не тільки оцінити поточний, а й спрогнозувати майбутній ТС ОК.

### **1.3.1 Основні види технічної діагностики**

У процесі діагностики людиною-оператором виконуються вимірювальні, контрольні та логічні операції за допомогою засобів діагностики для визначення дійсного стану конструкції [39]. Результати оцінки використовуються для прийняття рішення про необхідність проведення будь-яких робіт з технічного обслуговування.

Існує декілька підходів, які залежать від особливостей взаємодії засобів діагностування, ОК і людини-оператора [40]. У першому випадку об'єкт, як правило, тимчасово виводиться з експлуатації і на нього подаються тестові впливи (сигнали). Оцінка ТС за отриманими від ОК відгуками називається тестовим діагностуванням. У другому випадку об'єкт весь час знаходиться в експлуатації, а рішення про зміну його ТС здійснюється на основі вимірювання та аналізу діагностичних параметрів, яких може бути безліч для одного і того ж об'єкта. Такий підхід називається функціональною діагностикою. У цьому випадку також слід враховувати жорсткі вимоги до швидкодії і точності вимірювань [40].

Важливими для функціональної діагностики є: аналіз ОК чи його моделей, аналіз статичних та динамічних навантажень, які призводять до появи пошкоджень, обґрунтування та вибір первинних перетворювачів системи діагностики, а також обґрунтування і вибір методів обробки діагностичної інформації.

Функціональна діагностика включає в себе вимірювання різних фізичних величин, які часто необхідно вимірювати одночасно, застосовуючи складну математичну обробку вихідної діагностичної інформації, яка включає в себе обчислення спектральних характеристик, цифрову фільтрацію, статистику і т. д., що

можна здійснити, наприклад, за допомогою обчислювальних модулів, які входять до складу СРП [41, 42].

### **1.3.2 Етапи функціональної діагностики**

Об'єкт контролю – це складна система взаємодіючих елементів (деталей і вузлів, кількість яких може бути досить великою), які по-різному впливають на можливість виходу конструкції з режиму нормальної експлуатації. Тому на першому етапі при здійсненні функціональної діагностики ОК важливо виділити ті конструктивні елементи, які мають найбільший вплив на точність отриманих результатів. Оскільки діагностується унікальна (не серійного виробництва) конструкція, то виявлення елементів, що обмежують її ресурс, здійснюється за допомогою натурних випробувань або на основі аналізу математичної чи імітаційної моделі ОК.

На другому етапі, визначивши набір елементів для діагностики, необхідно вибрати діагностичні параметри, значення яких однозначно пов'язані з ТС одного або групи елементів конструкції. Ці діагностичні параметри характеризуються номінальними значеннями і полем допусків, залежністю номінальних значень від зовнішніх динамічних збурень, закономірностями зміни в залежності від часу експлуатації, необхідною точністю вимірювань і т. і. [41]. Зв'язок діагностичних параметрів з ТС ОК або його структурними елементами, а також залежність параметрів від зазначених вище факторів, як і при встановленні набору елементів для діагностики, знаходиться на основі спеціальних випробувань або аналізу математичних чи імітаційних моделей.

За інформативністю параметри можна умовно розділити на дві групи: узагальнені та локальні. Узагальнені параметри несуть в собі велику кількість інформації і характеризують стан декількох елементів, а локальні – тільки одного елемента конструкції ОК. При визначенні набору діагностичних параметрів перевага віддається параметрам, які мають прямий функціональний зв'язок з ТС елемента, що діагностується та характеризується великою інформативністю, до-



ступністю і надійністю засобів вимірювань для кожного обраного параметра, а також найменшими трудомісткістю і вартістю вимірювань [41].

Наступним етапом після визначення діагностичних параметрів є вибір, удосконалення або розробка нових методів і засобів функціональної діагностики. Враховуючи широкий спектр параметрів для діагностування, що нараховує близько 200 найменувань [41], методи діагностики використовують практично всі відомі методи вимірювань фізичних величин. Не всі ці методи рівнозначні і однаково широко використовуються. До найбільш значущих [41, 43] слід віднести вібродіагностику, контроль теплових полів за допомогою тепловізорів, спектральний аналіз електричних струмів, хімічний аналіз технологічних рідин і відпрацьованих газів. Кожен з методів використовується для виявлення певних дефектів при дотриманні деяких умов. Для вирішення найбільш складних завдань використовують комплекси різних методів.

На сьогоднішній день завдяки своєму широкому спектру можливостей такі засоби функціональної діагностики як СРП набули великого розповсюдження в найрізноманітніших сферах промисловості у тому числі для контролю резервуарів для зберігання ЕНР. Розвиток цих систем відбувається постійно, наприклад, за рахунок удосконалення первинних перетворювачів, які входять у склад будь-якої СРП. Перспективними напрямками розвитку також можуть бути: технології бездротового живлення та оптичної передачі даних, нові підходи до відображення діагностичної інформації та прогнозування ТС ОК, тощо.

Знання природи, характеру і причин виникнення дефектів необхідно для правильного вибору методів і засобів діагностики. Тому успішне застосування діагностики можливе лише при тісній співпраці розробників апаратури з технологами, конструкторами і співробітниками експлуатаційних служб [44].

Вибір конкретної методики функціональної діагностики залежить від:

- структурного, функціонального і вібраційного стану ОК;
- контрольної придатності ОК;
- завдань діагностики: виявлення пошкоджень, критичних навантажень, зміни діагностичних параметрів.

### **1.3.3 Загальна характеристика методів функціональної діагностики металевих і неметалевих конструкцій та їх елементів**

Функціональна діагностика дозволяє [40, 45, 46]:

- 1) виявити пошкодження, або дефекти на початковій стадії їх розвитку;
- 2) визначити причини, що викликали дефекти;
- 3) оцінити допустимість і доцільність подальшої експлуатації конструкції з урахуванням прогнозування її ТС при виявлених дефектах;
- 4) оптимізувати режими експлуатації, що дозволяє безпечно експлуатувати конструкцію з виявленими дефектами до моменту її виводу в ремонт;
- 5) організувати обслуговування і ремонт по ТС (замість регламентованого обслуговування і ремонту), забезпечення підготовки і виконання якісних ремонтів.

Методи неруйнівного контролю (МНК) або дефектоскопія, – це узагальнююча назва методів контролю матеріалів (виробів), що використовуються для виявлення порушення суцільності або однорідності макроструктури, відхилень хімічного складу й інших цілей, без необхідності руйнування зразків матеріалу й/або виробу в цілому.

Основними областями застосування МНК є: дефектоскопія відповідальних конструкцій та їх елементів; дефектоскопія споруд тривалої експлуатації; безперервна дефектоскопія особливо відповідальних елементів конструкцій для зберігання/утримання ЕНР; проведення досліджень структури матеріалів і дефектів у виробках з метою вдосконалення технології.

Залежно від принципу роботи всі МНК діляться на: акустичні (ультразвукові); капілярні; магнітні (або магнітопорошкові); оптичні (візуально-оптичні); радіаційні; радіохвильові; теплові; контроль пошуком течі; електричні; електромагнітні, або вихрострумові (методи вихрових струмів) та вібраційні.

Акустичні методи засновані на реєстрації коливань, збуджуваних або виникаючих у контрольованому об'єкті. Їх застосовують для виявлення поверхневих і внутрішніх дефектів (порушень суцільності, неоднорідності структури,

міжкристалічній корозії, дефектів склейки, пайки, зварювання й т.п.) у деталях і виробах, виготовлених з різних матеріалів. Вони дозволяють контролювати геометричні параметри при односторонньому допуску до виробу, а також фізико-механічні властивості металів і металовиробів без їхнього руйнування.

Капілярні методи засновані на капілярному проникненні крапель індикаторних рідин у порожнини поверхневих дефектів. Вони дозволяють виявляти термічні й шліфовочні тріщини, волосовини, закати й інші дефекти. Капілярні методи можуть бути застосовані для виявлення дефектів у деталях з металів і неметалів простої і складної форми.

Магнітні методи контролю засновані на реєстрації магнітних полів розсіювання, що виникають над дефектами, або на визначенні магнітних властивостей контрольованих виробів. Ці методи дозволяють виявити дефекти типу несучільності матеріалу (тріщини, волосовини, закати), а також визначити механічні характеристики феромагнітних сталей і чавунів по зміні їхніх магнітних характеристик.

Візуально-оптичні методи контролю засновані на взаємодії світлового випромінювання з ОК. Оптичні методи широко застосовують через велику різноманітність способів одержання первинної інформації про наявність зовнішніх дефектів не залежно від матеріалу контрольованого виробу.

Теплові методи засновані на реєстрації змін теплових або температурних полів ОК. Вони застосовуються для будь-яких матеріалів. Розрізняють пасивний (на об'єкти не впливають зовнішнім джерелом тепла) і активний (об'єкт нагрівають або охолоджують) методи. Вимірюваним інформативним параметром є температура або тепловий потік.

Методи контролю пошуком течі засновані на реєстрації індикаторних рідин і газів, що проникають у наскрізні дефекти ОК. Їх застосовують для контролю герметичності працюючих під тиском зварних резервуарів, балонів, трубопроводів, паливної й гідроапаратури, масляних систем силових установок та інших.

Вібраційна діагностика – це метод діагностування технічних систем і устаткування, заснований на аналізі параметрів вібрації [47, 48], що створюється працюючим обладнанням або є вторинною вібрацією, яка зумовлена структурою досліджуваного об'єкта. Вібраційна діагностика, як і інші методи технічної діагностики, покликана здійснювати пошук несправностей і оцінювати ТС досліджуваного об'єкта.

Інтенсивний розвиток методу в останні роки пов'язаний із здешевленням електронних обчислювальних засобів і спрощенням аналізу вібраційних сигналів.

Перевагами методу є:

- метод дозволяє знаходити приховані дефекти;
- метод, як правило, не вимагає збірки-розбирання ОК;
- малий час діагностування;
- можливість виявлення несправностей на етапі їхнього зародження.

До недоліків слід віднести:

- особливі вимоги до способу кріплення датчика вібрації;
- залежність параметрів вібрації від великої кількості факторів і складність виділення вібраційного сигналу обумовленого наявністю несправності, що вимагає глибокого застосування методів кореляційного й регресійного аналізу;
- точність діагностування в більшості випадків залежить від числа згладжених (осереднених) параметрів.

Таким чином, враховуючи переваги і недоліки розглянутих методів, для функціональної діагностики РВС доцільним є використання вібраційної діагностики, оскільки вона дає змогу виявити несправності на етапі їхнього зародження та не потребує виведення ОК з режиму експлуатації.

Але для описаних вище об'єктів надзвичайно актуальним є попередження появи пошкоджень, які можуть виникнути під впливом комплексу збурень різного, природного або техногенного, походження. Наприклад, вплив вітрових навантажень зумовлює появу вібрацій, зміну просторового положення, збільшення

рівня напружень та деформацій в елементах конструкцій, що в результаті може призвести до виникнення пошкоджень. Тому при функціональній діагностиці об'єктів необхідно застосовувати такі методи, що дають змогу не тільки визначати наявність пошкоджень, а й попередити їх виникнення.

#### **1.4 Тенденції розвитку систем раннього попередження пошкоджень**

Як згадувалося раніше, вдосконалення СРП у більшості випадків відбувається завдяки підвищенню точності первинних перетворювачів, проте широке використання мікропроцесорної техніки, потужна математична база та, як наслідок, розвиток методів і засобів обробки діагностичної інформації, стрімкий розвиток нових перспективних методів дослідження об'єктів та процесів на основі імітаційного моделювання, нові можливості багатовимірної візуалізації діагностичної інформації сприяють удосконаленню систем функціональної діагностики за допомогою можливостей сучасних комп'ютерних та інформаційних технологій.

Можна виділити основні напрямки застосування комп'ютерних та інформаційних технологій в системах функціональної діагностики [49]:

- збір і обробка інформації;
- вибір обладнання для теоретичних та експериментальних досліджень;
- теоретичні (математичні розрахунки, прогнозування, імітаційне моделювання об'єктів і процесів, тощо) і експериментальні дослідження;
- обробка, оцінка, узагальнення, оформлення та подання результатів.

Аналіз даних є невід'ємною частиною всіх прикладних досліджень. Найбільш фундаментальними підходами аналізу даних є [50]: візуалізація (гістограми, точкові ділянки, ділянки поверхні, дерево карт, тощо), статистика (гіпотеза тест, регресія й інші), видобуток даних (наприклад, асоціації гірничодобувної промисловості) і методи машинного навчання (кластеризація, класифікація, дерева рішень, тощо). Розширення функціональних можливостей систем функціональної діагностики (у тому числі СРП) стає можливим за допомогою інтеграції

в них нових способів візуалізації даних вимірювань, використовуючи, наприклад, концепцію систем захоплення руху.

Типова система захоплення руху являє собою набір датчиків, пов'язаних з контрольованим об'єктом [51]. Комплекс датчиків, які встановлюються на ОК та працюють на основі різних фізичних принципів, дозволяє відстежувати, наприклад, переміщення елементів конструкції для оцінки поточного напружено-деформованого стану шляхом створення комп'ютерної анімації. Інформація з датчиків надходить на комп'ютер і обробляється відповідним програмним забезпеченням, завдяки чому відтворюється, наприклад, математичний опис рухів ОК, який, у свою чергу, використовується для «оживлення» його комп'ютерної моделі. Наприклад, якщо є інженерна або будівельна споруда, на якій розташована система датчиків, і її тривимірна модель, то на моделі будуть відображатися ті ж зміни, які відбуваються з ОК та виміряні датчиками.

У сучасних умовах існує можливість реалізації таких моделей різних за складністю об'єктів чи процесів або на основі обчислювальних кластерів, тобто декількох потужних комп'ютерів об'єднаних за допомогою локальних і глобальних мереж в єдиний комплекс, або на основі суперкомп'ютерів. Ці обчислювальні комп'ютерні системи можуть обмінюватися інформацією через локальну мережу або мережу Інтернет, і процеси обчислень та обробки інформації, таким чином, можуть здійснюватися віддалено з будь-якого місця на планеті.

Реалізація нових способів візуалізації даних вимірювань з використанням у системах функціональної діагностики сучасних інформаційних технологій, наприклад, імітаційного моделювання, є перспективним напрямком розвитку засобів моніторингу та діагностики ТС РВС, які знаходяться в експлуатації. Тому для вдосконалення системи функціональної діагностики важливим є завдання пошуку та реалізації способів відображення результатів вимірювань з використанням можливостей сучасного програмного забезпечення.

Іншим прикладом нових та перспективних технологій є технологія бездротової передачі живлення. Пристрій на основі даної технології являє собою котушку з конденсатором. Якщо змусити цю котушку резонувати, підключивши до

неї, наприклад, генератор, вона почне пульсувати на високих частотах змінного струму, створюючи магнітне поле [52]. Якщо в це магнітне поле помістити іншу котушку з точно такою ж резонансною частотою, то вони почнуть передавати між собою енергію. Таким чином підключений до другої котушки пристрій буде отримувати живлення.

Переваги цього методу:

- передача енергії відбувається тільки на пристрій, що працює на тій же частоті, що виключає випадкове виникнення даного процесу;
- немає випромінювання і електричних полів.

Основним недоліком даної технології в наш час є низький коефіцієнт корисної дії пристроїв, побудованих на її основі, при передачі живлення на відстані більші за 1-2 метри.

Альтернативою попередній є технологія однодротової передачі живлення [53]. Для реалізації пристрою однодротової передачі необхідно високочастотний електричний струм (наприклад, 20 кГц) подати на коливальний контур, налаштований на дану частоту, і з'єднати його з аналогічним приймаючим контуром одним дротом. Втрати на нагрів дроту в лінії мінімальні завдяки тому, що у резонансному режимі в лінії передачі досягається висока напруга з малими струмами. Це явище дозволяє використовувати тонкий (у порівнянні з тим, що використовується в класичній лінії передачі) дріт малого перерізу.

Головними перевагами однодротової передачі живлення є:

- малі втрати електроенергії;
- більшість ліній електропередач можна зробити підземними;
- в однодротовому кабелі неможливі короткі замикання.

Технології бездротової та однодротової передачі живлення (електричної енергії) усе ще потребують удосконалення для їх безпосередньої інтеграції в СРП.

## 1.5 Огляд виконаних раніше робіт за напрямком досліджень

На сьогоднішній день існує безліч конструкцій, у яких зберігаються ЕНР. У більшості випадків це резервуари з різними: геометричною формою, розмірами, положенням у просторі та кількістю додаткових конструктивних особливостей. До резервуарів для зберігання/утримання ЕНР висувають особливі вимоги щодо конструктивних рішень, оскільки вони зводяться в суворих умовах Півночі при вічній мерзлоті, у сухому і жаркому кліматі, у віддалених та/або неосвоєних, важкодоступних, сейсмічних районах, на просадних ґрунтах, над гірничими виробками і так далі. Саме тому функціональна діагностика даного класу об'єктів у тому числі за допомогою СРП є важливою та актуальною проблемою сучасності.

Основними завданнями, які розглядаються науковцями у всьому світі за напрямком даних наукових досліджень є:

- удосконалення методів розрахунку резервуарів на міцність та стійкість;
- удосконалення первинних перетворювачів;
- побудова СРП на основі нових технологій;
- розробка моделей як фізичних, так і комп'ютерних для теоретичних досліджень впливу зовнішніх збурень;
- використання сучасних інформаційних технологій.

Отже, проведемо огляд виконаних раніше робіт зі статистичного аналізу втрати несучої здібності подібних об'єктів, досліджень за допомогою спеціальних комп'ютерних програм, засобів моніторингу та захисту від вітрового навантаження, тощо.

Дуже часто при розрахунках резервуарів необхідно підібрати товщини основних несучих елементів, у тому числі параметри їх підсилення, для забезпечення потрібного рівня наповнення резервуара, а також стійкості його форми та положення під дією постійних, тимчасових або особливих навантажень. Проте відсутність однозначного рішення цієї задачі потребує введення деякого критерію. Його мінімізація дозволить отримати єдине рішення. У такому вигляді зада-



ча забезпечення міцності, стійкості і сейсмостійкості корпусу резервуара в літературі та нормативно-технічній документації не ставиться [54].

У роботі [55] показано, що можна додатково мінімізувати вагу резервуара при заданих основних його розмірах за рахунок мінімізації ваги стінки шляхом вибору неоднакових висот поясів. Методики розрахунку рівномірних і нерівномірних снігових навантажень наведені в [56]. У роботі [57] при розрахунку резервуарів на стійкість форми і положення при вітрових навантаженнях окрім середнього зовнішнього (нерівномірно розподіленого по периметру, [54]) і внутрішнього статичного тиску враховується також пульсаційна складова вітрового навантаження. Питання розрахунку навантажень на фундамент розглянуто в [58].

У [59, 60] наведені причини виникнення пошкоджень та руйнування елементів конструкцій, які не можуть бути враховані розрахунками міцності і стійкості. По-перше, це помилки, які можуть закладатися на стадіях проектування і виробництва. В якості експлуатаційних факторів розглядаються як суб'єктивні чинники, пов'язані з порушеннями умов і режимів експлуатації, так і чинники зовнішніх неконтрольованих впливів. До особливих причин належать стихійні лиха, аварії, техногенні катастрофи.

У роботах [61, 62] автори провели аналіз статистичних даних причин виходу РВС з ладу за останні тридцять (і навіть більше) років. Головною причиною аварійних ситуацій указано крихке руйнування, що для більшості резервуарів відбувалося з навітряного боку, тобто на найбільш холодній стороні корпусу РВС, в області уторного шва. Тріщини утворювалися там, де були надрізи, незаварені кратери, непроварені стики, різко виражені напливи, концентратори у вигляді тріщин у зварному шві і так далі. У всіх випадках руйнуванню сприяє неправильний вибір сталі для резервуарів [63], що будуються в північних районах, коли замість низьколегованої сталі використовувалася киячка. Також руйнуванню сприяли неякісний монтаж та ремонт.

Автори [64, 65] зазначають, що експлуатаційні пошкодження споруд спеціального призначення (резервуари, трубопроводи, сховища) найчастіше проявляються у вигляді тріщин, наскрізної корозії, втрати стійкості, а найнебезпечніши-

ми місцями таких об'єктів є зварні шви, днища, місця кріплень. У широкому розумінні [66] експлуатаційні ушкодження можна виразити через поняття фізичного (конструкційного) зносу під дією системи руйнуючих факторів (старіння, перевантаження, корозія, дефекти, втома тощо), що призводить до зменшення терміну служби, руйнування і експлуатаційної непридатності елементів конструкцій інженерних споруд.

У роботі [67] було проведене чисельне комп'ютерне моделювання псевдо-часового стану схилу для того, щоб зрозуміти ризики для транспортної інфраструктури, деяких будинків і водосховища та вжити термінові заходи для стабілізації схилу. Озеро Сауріс є гідроелектричним басейном, обмеженим бетонною греблею з подвійними арками і висотою 136 м. Гребля надійно закріплена в корінних породах, але глинисті утворення, особливо в нижній частині схилів, зробили все, щоб водозбірний басейн був більш схильним до зсувів. В останні роки зсув «La Maina» розкрив кілька швів на поверхні близько 100 тисяч квадратних метрів, витісняючи близько 1,5 мільйона кубометрів матеріалу. Тому авторами створено систему моніторингу, яка складається з чотирьох інклінометрів, трьох дровових екстензометрів і десяти еталонних GPS стовпів, щоб перевірити поверхневі і глибинні зсуви. Для проведення чисельного моделювання використано зібрані дані, геологічні та геоморфологічні свідчення. Достовірність результатів перевірено шляхом порівняння комп'ютерної моделі з морфологічним доказом руху. Розроблено і реалізовано заходи щодо послаблення наслідків відповідно до результатів, отриманих шляхом моделювання.

Як уже згадувалося вище, при низьких температурах вітрове навантаження може призвести до руйнування РВС. Ймовірність руйнування зростає з урахуванням можливості неправильного вибору сталі для критичних умов експлуатації. У роботі [68] пропонується захист РВС від вітрового навантаження у вигляді циліндричної конструкції одного з ОК діаметру, яка розташована з його навітряної сторони.

Також в останні роки все частіше розглядають можливість використання новітніх технологій для розробки СРП або їх складових частин (блоків). Прикла-

дом можуть слугувати роботи [69-71], в яких розроблено СРП на основі технології нейронних мереж переважно для моніторингу зсувних процесів. Проте дані системи можливо адаптувати для моніторингу ТС інших об'єктів.

На сьогоднішній день, завдяки розвитку інформаційних технологій, задачі дослідження конструкцій при динамічних навантаженнях, а також розробки нових ефективних рішень захисту об'єктів значно спростилися. Чисельне комп'ютерне моделювання, наприклад, метод скінчених елементів, що використовується в програмному комплексі ANSYS, є потужним інструментом дослідження реальних об'єктів та проектування нових за умов, що:

- аналітичні методи є, але дуже складні і трудомісткі;
- чисельне моделювання може бути єдиною можливим внаслідок складності постановки експерименту і спостереження явищ у реальних умовах (дослідження поведінки штучних супутників Землі, відтворення кліматичних умов району Антарктики, тощо);
- може знадобитися стиск шкали часу (як уповільнення, так і прискорення, наприклад, для завдань прогнозування).

По суті, чисельне моделювання є експериментальною і прикладною методологією, яка має наступні цілі [51]:

- 1) Описати поведінку об'єкта чи системи.
- 2) Побудувати теорії і гіпотези, які можуть пояснити поведінку (що спостерігається) об'єкта чи системи.
- 3) Використовувати дані теорії для передбачення майбутньої поведінки об'єкта чи системи.

Але чисельні методи дають наближене рішення поставленої задачі [72]. Основна мета всіх методів – дискретизація чи апроксимація (заміна або наближення) вихідної задачі іншою задачею, більш зручною для рішення за допомогою спеціалізованих програмних комплексів. При цьому рішення апроксимуючої задачі залежить від деяких параметрів, керуючи якими, можна визначити рішення з необхідною точністю.

У науково-дослідній роботі [73] розглянуто комп'ютерне моделювання напружень у сферичному резервуарі з вуглецевої сталі для зберігання розрідженого природного газу, використовуючи скінчено-елементний аналіз на основі пустотілої оболонки з трикутних елементів. Використовуючи рівняння теорії пружності, сферичні резервуари постійної товщини з вуглецевої сталі піддавалися різним навантаженням. У цій роботі підкреслюється необхідність правильного визначення типу скінчених елементів, щоб отримати необхідну поверхню.

У роботі [74] за допомогою пакету LS-DYNA моделювалося катастрофічне руйнування РВС з нафтою та оцінювалися можливі фактори впливу на огорожувальну стіну. Для розрахунку був узятий випадок, у якому частина огорожувальної стіни оточує крайній (кутовий) резервуар із групи. Фронтальна та поперечна (щодо розташування початкової тріщини) ділянки захисної стіни розташовані на відстані 6м від нього. У результаті було виявлено наступне:

- наявність початкової тріщини на рівні 3-4 поясів призводить до швидкого розриву стінки по всій висоті без зміни полів швидкості та тиску в рідині;
- під дією внутрішнього гідростатичного тиску рідини подальше руйнування резервуара супроводжується радіальним рухом стінки, розкриттям вертикальної тріщини та відривом стінки від днища.

Розрахунок проводився на кластері з шести вузлів з CPU P4. При цьому час розрахунку склав 46 годин при розмірі моделі близько 350 тисяч елементів.

Як і в попередньому випадку, метою роботи [75] було визначення динамічних навантажень на захисну стіну спеціальної конструкції, але моделювався РВС більшого об'єму. Моделювання процесу проходило в тривимірній постановці в програмному середовищі пакету для інженерних розрахунків LS-DYNA. Результати моделювання виявилися аналогічними до попереднього випадку:

- руйнування РВС після утворення вертикальної тріщини починається випинанням стінки в 2-4 поясах;
- протягом наступних декількох секунд відбувається розкриття вертикальної тріщини та повний відрив стінки від днища.

Розмір використаної моделі був близько 500 тисяч елементів, час розрахунку та характеристики робочої станції не приводяться.

Сейсмічний вплив на РВС з рідиною розглянуто в роботі [76]. Відомо, що наявність рідини призводить до зміни власних частот і форм конструкції в порівнянні з коливаннями порожнього резервуару, додаткового гідродинамічного тиску на стінки і дно. Тому для тонкостінних РВС гідродинамічний розрахунок є основним, оскільки маса рідини значно перевищує масу конструкції.

Сейсмічний вплив моделювався горизонтальним прискоренням основи по одній з осей. Модальний та динамічний аналіз проведено у програмному середовищі пакету ANSYS, наведено оцінку рівня напружень у стінці РВС та висоти поверхневої хвилі, яка виникає при коливаннях (щоб уникнути виплеску з резервуару, удару в кришку).

Аналогічний розрахунок було проведено з використанням пакету LS-DYNA [77]. Розрахунок показав, що максимальні напруження досягаються в максимумах високочастотної складової, коли вони знаходяться поряд з максимумами низькочастотної складової. Цей результат добре узгоджується з результатами, отриманими в попередній роботі.

Класична задача про коливання рідини в РВС під дією зовнішньої масової сили (сейсміка, коливання палива в баку і т. п.), коли відбувається втрата стійкості первісного руху, розглянута в роботі [78]. На важку рідину, яка заповнює половину обсягу резервуару, діє в поздовжньому напрямку періодична сила. У результаті було виявлено наступне:

- при певних частотах і амплітудах зовнішньої сили з плином часу рух рідини перестає бути плоскопаралельним і виникають несиметричні коливання в поперечній площині.
- діюча при цьому на резервуар бічна компонента сили близька по величині з поздовжньою.

У роботі [79] моделюється вібрація горизонтального циліндричного резервуару, частково заповненого рухомою рідиною. Тривимірний квазістатичний модель частково заповненого резервуару розроблена і інтегрована в комплексну

тривимірну модель автомобіля, щоб вивчити динамічні характеристики в залежності від прискорення та рівня заповнення. Рух рідини, що виникає в площинах крену і тангажу резервуара, відбувається залежно від поздовжнього прискорення, а потім відповідно зміщене навантаження виражається через координати центру мас і моменти інерції мас в об'ємі рідини, припускаючи, незначний вплив власної частоти вихлюпування і в'язких ефектів. У результаті проілюстровано вплив поздовжнього прискорення системи резервуара на нахил поверхні рідини і на моменти інерції.

Отже, аналіз сучасного стану та шляхів розвитку функціональної діагностики об'єктів для зберігання/утримання ЕНР показав наявність міцної математичної бази для розрахунку міцності та стійкості РВС, велику кількість робіт по створенню математичних моделей та їх чисельному дослідженню. З іншого боку, для спрощення аналітичних розрахунків дуже часто виключають ті чи інші зовнішні чи внутрішні (щодо ОК) умови, які можуть вносити значні уточнення в результат. Також малодослідженою є область комп'ютерного моделювання вітрового навантаження на РВС та засобів його захисту, а як зазначено вище, вітрові навантаження можуть призводити до появи вібрації об'єкта, підвищення рівня напружень та деформацій в його елементах, тощо. Розвиток систем функціональної діагностики (у тому числі СРП) в основному зосереджений на вдосконаленні первинних перетворювачів, а дослідження та впровадження нових підходів до моніторингу ТС ОК досить обмежені.

Нові підходи до моніторингу ТС об'єктів вимагають детального аналізу впливу динамічних збурень на ОК, розробку спеціальних алгоритмів оцінки та прогнозування ТС об'єктів, удосконалення існуючих систем функціональної діагностики таким чином, щоб попередити в об'єктах появу та розвиток дефектів, що можливо зробити тільки з одночасним обґрунтуванням, розробкою та впровадженням спеціальних засобів захисту.

Усі зазначені завдання можуть бути вирішені на основі імітаційного моделювання, яке є потужним інструментом наукових досліджень і дає можливість подолати існуючу на сьогоднішній день складність у вирішенні актуальної задачі

забезпечення безпечної експлуатації резервуарів з ЕНР, що знаходяться у важкодоступних місцях під впливом динамічних та кліматичних навантажень.

### **1.6 Мета та завдання даних наукових досліджень**

Метою роботи є обґрунтування та вдосконалення на основі імітаційного моделювання системи функціональної діагностики та засобів захисту резервуарів з екологічно-небезпечними речовинами, які експлуатуються у важкодоступних місцях під впливом природних та техногенних збурень.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення наступних задач:

1. Проаналізувати сучасний стан методів та засобів функціональної діагностики резервуарів з ЕНР та обґрунтувати шляхи їх вдосконалення для забезпечення попередження руйнування резервуарів та витоків ЕНР.

2. Виконати геометричне та імітаційне моделювання резервуара в умовах вітрового навантаження та встановити характер і функціональну залежність впливу вітрового навантаження на резервуар.

3. Розробити, теоретично обґрунтувати та дослідити геометричні моделі засобів захисту резервуарів від тиску повітряного потоку, проаналізувати ефективність засобів захисту для резервуарів з наземним та підземним фундаментами.

4. Розробити та обґрунтувати загальну структуру вдосконаленої багатоканальної системи функціональної діагностики резервуарів на основі використання їх моніторингових моделей.

5. На основі імітаційного моделювання розробити підсистему візуалізації для відображення та прогнозування характеристик напружено-деформованого стану, просторового положення та вібраційного стану резервуару в реальних умовах навантажень.

6. Оцінити адекватність використаних імітаційних моделей на основі експериментальних досліджень макета каналу вимірювання вібрації системи діагностики.

## 7. Впровадити результати досліджень.

Представлені в даній науково-дослідній роботі положення і результати, які виносяться на захист, відповідають формулі паспорту спеціальності 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин за наступними пунктами:

- технічні засоби для систем контролю та захисту технічного стану об'єктів;
- прилади для систем функціональної діагностики об'єктів;
- прилади і засоби контролю та захисту навколишнього природного середовища.



## РОЗДІЛ 2

### ГЕОМЕТРИЧНЕ ТА ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЗЕРВУАРА ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ ЕКОЛОГІЧНО-НЕБЕЗПЕЧНИХ РЕЧОВИН В УМОВАХ ВІТРОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Як показав проведений у розділі 1 аналіз причин виникнення аварійних ситуацій, одними з причин аварій РВС для зберігання ЕНР можуть бути помилки у проектному значенні розрахункової величини вітрового навантаження, неправильне уявлення про характер його розподілу по ОК, недостатній облік аеродинамічних характеристик, вібрація резервуара. Для забезпечення безпечної експлуатації резервуара постає завдання безперервного моніторингу його ТС за допомогою методів та засобів функціональної діагностики для попередження виникнення аварійних ситуацій.

Для об'єктів, які експлуатуються в умовах динамічних збурень (наприклад, вітрових навантажень) важливим є аналіз вітрового навантаження та визначення його критичних величин. Це дозволить обґрунтувати та забезпечити можливість безпечної експлуатації об'єкта, якщо значення вітрового навантаження не перевищують проектні, або ж розробити ефективні засоби захисту у разі підвищених значень навантаження.

У якості ОК розглядається сталевий вертикальний зварний резервуар, установлений у важкодоступному місці, який експлуатується в складних умовах при динамічних та температурних навантаженнях у районі Антарктики. Технічні характеристики такого ОК, характеристики місця установки та навантажень наведено в Додатку Б.

У даному розділі проведено аналітичний розрахунок величини вітрового навантаження на вертикальний резервуар, за допомогою САД-програми створено геометричні моделі ОК та проведено імітаційне моделювання впливу вітрового навантаження на резервуар.

## 2.1 Аналітичний розрахунок величини вітрового навантаження

Нормативними документами встановлено два розрахункові значення для вітрового навантаження [19, 20]:

- граничне розрахункове значення навантаження – значення навантаження, що відповідає екстремальній ситуації, яка може виникнути не більш як один раз протягом терміну експлуатації конструкції, та використовується для перевірки граничних станів першої групи, вихід за межі яких еквівалентний повній втраті працездатності конструкції;
- експлуатаційне розрахункове значення навантаження – значення навантаження, що характеризує умови нормальної експлуатації конструкції. Як правило, експлуатаційне розрахункове значення використовується для перевірки граничних станів другої групи, пов'язаних з труднощами нормальної експлуатації (виникнення неприпустимих переміщень конструкції, неприпустима вібрація та неприпустимо велике розкриття тріщин у залізобетонних конструкціях тощо).

Граничне розрахункове значення вітрового навантаження визначається за виразом [19]:

$$W_m = \gamma_{fm} \cdot W_0 \cdot C, \quad (2.1)$$

де  $\gamma_{fm}$  – коефіцієнт надійності за граничним розрахунковим значенням вітрового навантаження;  $W_0$  – характеристичне значення вітрового тиску, Па;  $C$  – коефіцієнт, що визначається за виразом:

$$C = C_{aer} \cdot C_h \cdot C_{alt} \cdot C_{rel} \cdot C_{dir} \cdot C_d, \quad (2.2)$$

де  $C_{aer}$  – аеродинамічний коефіцієнт;  $C_h$  – коефіцієнт висоти споруди;  $C_{alt}$  – коефіцієнт географічної висоти;  $C_{rel}$  – коефіцієнт рельєфу;  $C_{dir}$  – коефіцієнт напрямку;  $C_d$  – коефіцієнт динамічності.

Експлуатаційне розрахункове значення вітрового навантаження визначається за виразом [19]:

$$W_e = \gamma_{fe} \cdot W_0 \cdot C, \quad (2.3)$$

де  $\gamma_{fe}$  – коефіцієнт надійності за експлуатаційним розрахунковим значенням вітрового навантаження.

Аеродинамічний коефіцієнт  $C_{aer}$ , який слід враховувати при визначенні вітрового тиску, прикладеного нормально до зовнішніх поверхонь, визначається залежно від форми ОК.

У випадку циліндричної форми резервуара коефіцієнт  $C_{aer}$  дорівнює коефіцієнту  $C_{el}$ , який розраховується за виразом [19]:

$$C_{el} = C(\beta) \cdot k_1, \quad (2.4)$$

де  $k_1$  – коефіцієнт, що визначається співвідношенням висоти ОК  $h(m)$  і його діаметра  $d(m)$ , як наведено в табл. 2.1;  $C(\beta)$  – коефіцієнт, що визначається з графіка залежності в [19];  $\beta$  – кут, що характеризує половину зони високого тиску [19].

Таблиця 2.1 – Значення коефіцієнта  $k_1$  для заданих значень співвідношення  $h/d$

$h/d$		0,2	0,5	1	2	5	10	25
$k_1$	$C_\beta < 0$	0,8	0,9	0,95	1,0	1,1	1,15	1,2
	$C_\beta > 0$	1						

Оскільки кут  $\beta$  не перевищує  $30^\circ$ , то  $C(\beta) = 0,4$ . Тоді, відповідно до (2.4), отримаємо значення аеродинамічного коефіцієнта  $C_{el} = 0,4$ .

Коефіцієнт висоти споруди  $C_h$  враховує збільшення вітрового навантаження залежно від висоти ОК або його частини, що розглядається, над поверхнею землі ( $z = h$ ) та типу навколишньої місцевості [19, 20].

Типи місцевості, що оточує споруду, визначаються для кожного розрахункового напрямку вітру окремо:

- I – відкриті поверхні морів, озер, а також плоскі рівнини без перешкод, що піддаються дії вітру на ділянці довжиною не менш як 3 км;
- II – сільська місцевість з огорожами (парканами), невеликими спорудами, будинками і деревами;
- III – приміські і промислові зони, протяжні лісові масиви;
- IV – міські території, на яких принаймні 15 % поверхні зайняті будівлями, що мають середню висоту понад 15 м.

При визначенні типу місцевості споруда вважається розташованою на місцевості даного типу для певного розрахункового напрямку вітру, якщо у цьому напрямку така місцевість є на відстані  $30 \cdot Z$  при повній висоті споруди  $Z < 60$  м або 2 км – при більшій висоті [19].

Отже, враховуючи висоту контрольованого об'єкту та його належність до типу місцевості I з графіка залежності, наведеного в [19], можна визначити, що  $C_h \approx 2,5$ .

Коефіцієнт географічної висоти  $C_{alt}$  враховує висоту  $H$  (в кілометрах) розміщення споруди над рівнем моря і дорівнює одиниці, якщо  $H < 0,5$  км.

Коефіцієнт рельєфу  $C_{rel}$  враховує мікрорельєф місцевості поблизу місця розташування ОК і приймається таким, що дорівнює одиниці, за винятком випадків, коли конструкція розташована на пагорбі або схилі.

Коефіцієнт напрямку  $C_{dir}$  враховує нерівномірність вітрового навантаження за напрямками вітру і, як правило, приймається таким, що дорівнює одиниці. Значення  $C_{dir}$ , що відрізняється від одиниці, допускається враховувати при спеціальному обґрунтуванні тільки для відкритої рівнинної місцевості та при наявності достатніх статистичних даних.

Коефіцієнт динамічності  $C_d$  враховує вплив пульсаційної складової вітрового навантаження і просторову кореляцію вітрового тиску на ОК.

Для основних типів будівель і споруд значення  $C_d$  визначаються за графіками, приведеними в [19]. Для значень висоти та діаметра ОК  $C_d = 1$ .

Підставивши значення коефіцієнтів у формулу (2.2), отримаємо  $C = 1$ .

Коефіцієнт надійності за граничним розрахунковим значенням вітрового навантаження  $\gamma_{fm}$  визначається в залежності від заданого середнього періоду повторюваності  $T$  за табл. 2.2 [19].

Таблиця 2.2 – Значення коефіцієнта надійності  $\gamma_{fm}$  для відомих значень середнього періоду повторюваності  $T$

$T$ , років	5	10	15	25	40	50	70	100	150	200	300	500
$\gamma_{fm}$	0,55	0,69	0,77	0,87	0,96	1,0	1,07	1,14	1,22	1,28	1,35	1,45

Для об'єктів, що мають підвищений рівень відповідальності, для яких технічним завданням встановлена ймовірність  $P$  неперевіщення (забезпеченість) граничного розрахункового значення вітрового навантаження протягом встановленого терміну служби, середній період повторюваності граничного розрахункового значення вітрового навантаження обчислюється за формулою

$$T = T_{ef} \cdot K_p, \quad (2.5)$$

де  $T_{ef}$  – період ефективної роботи споруди, років;  $K_p$  – коефіцієнт, визначений за табл. 2.3 залежно від імовірності  $P$ .

Таблиця 2.3 – Значення коефіцієнта  $K_p$  для значень імовірності  $P$

$P$	0,37	0,5	0,6	0,8	0,85	0,9	0,95	0,99
$K_p$	1,00	1,44	1,95	4,48	6,15	9,50	19,50	99,50

Згідно з [19] закладена в проект швидкість вітру може бути перевищена не більше одного разу в п'ятдесят років. У цьому випадку ймовірність неперевищення граничного розрахункового значення вітрового навантаження протягом встановленого терміну служби  $P=0,95$ . Тоді взявши коефіцієнт  $K_p=19,5$  та враховуючи, що період ефективної роботи споруди  $T_{ef}=40$  років, за формулою (2.5) можна розрахувати середній період повторюваності  $T=780$  (років).

У табл. 2.2 немає даного значення середнього періоду повторюваності, тому коефіцієнт надійності необхідно визначити. У [19] вказано, що проміжні значення можна отримати за допомогою лінійної інтерполяції. На рис. 2.1 зображено графік, на якому крім інтерполяції міститься також екстраполяція значень коефіцієнта надійності, яка робить припущення про можливі значення коефіцієнта поза вказаними в табл. 2.2 межами.

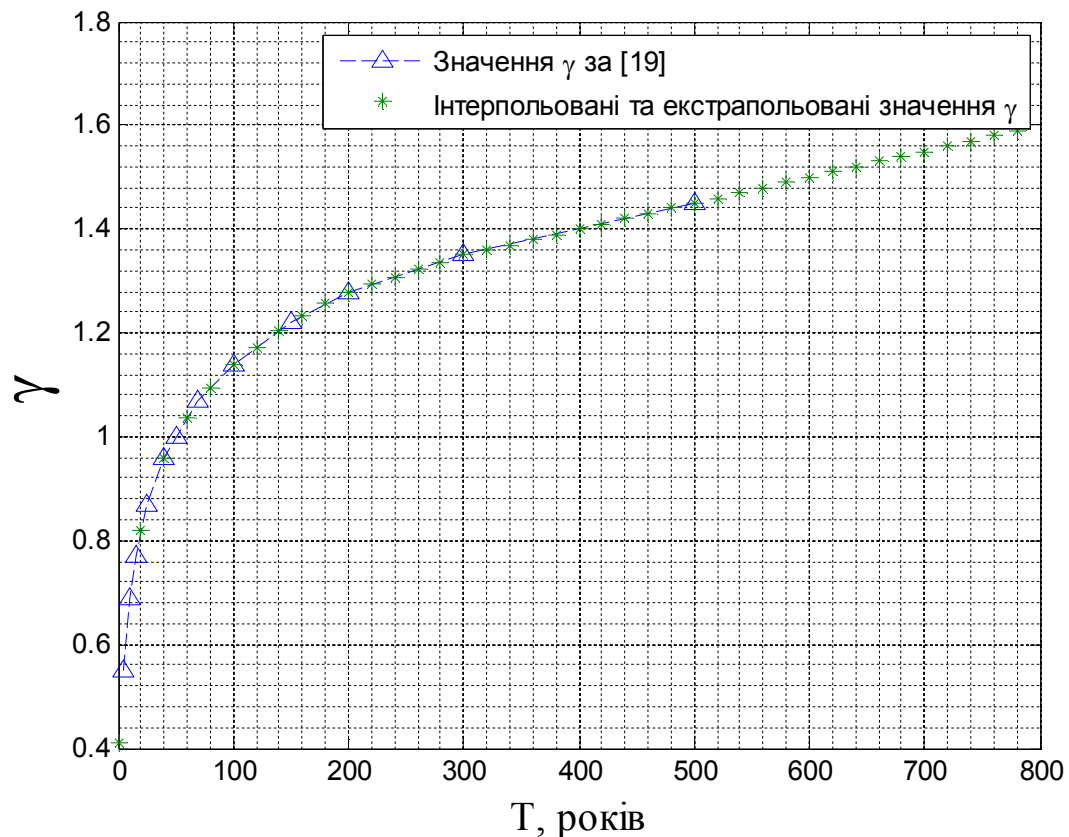


Рисунок 2.1 – Графік залежності коефіцієнта надійності від значення середнього періоду повторюваності

Отже, при середньому періоді повторюваності  $T = 780$  років значення коефіцієнта надійності буде  $\gamma_{fm} = 1,59$ .

Коефіцієнт надійності за експлуатаційним розрахунковим значенням вітрового навантаження  $\gamma_{fe}$  визначається за табл. 2.4 в залежності від  $\eta$  – відносного часу, протягом якого можуть бути порушені вимоги другого граничного стану. Наприклад, для деяких об'єктів протягом 2 % від часу експлуатації може бути допущено перевищення прогинів, які нормуються з технологічних міркувань.

Таблиця 2.4 – Значення коефіцієнта надійності  $\gamma_{fe}$  для значень відносного часу  $\eta$

$\eta$	0,002	0,005	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,1
$\gamma_{fe}$	0,42	0,33	0,27	0,21	0,18	0,16	0,14	0,09

Для об'єктів, які становлять підвищену екологічну небезпеку час порушення другого граничного стану повинен бути мінімальним.

Проведемо розрахунок загального часу порушення другого граничного стану ОК при  $\eta = 0,2\%$  (як для об'єкта з високими вимогами до надійності) та ефективній експлуатації споруди протягом  $T_{ef} = 40$  років

$$\Delta_p = \eta \cdot T_{ef} = 0,002 \cdot 40 = 0,08 \text{ (років)}.$$

Для більш наглядного прикладу перерахуємо цей показник у хвилини за добу

$$\Delta_o = 0,002 \cdot 24 \cdot 60 \approx 3 \text{ (хв/добу)}.$$

Таким чином, перевищення допустимого рівня деформацій або вібрації протягом 3 хвилини за добу зумовить непридатність конструкцій до нормальної

експлуатації чи знизить її довговічність. Тому це значення може вважатися діагностичною ознакою при визначенні ТС ОК і пороговим значенням для ввімкнення попереджувального сигналу (звукового або оптичного) СРП.

Характеристичне значення вітрового тиску розраховується за виразом [20]:

$$W_0 = \frac{\rho}{2} \cdot V_0^2, \quad (2.6)$$

де  $V_0$  – значення швидкості вітру ( $\text{м/с}$ ) на висоті 10м над поверхнею землі для типу місцевості І;  $\rho$  – значення щільності повітря ( $\text{кг/м}^3$ ) при заданій температурі навколишнього середовища.

Для наведених у Додатку Б проектних даних та креслень резервуара знайдемо середнє розрахункове значення температури повітря  $t_{\text{сер}}$ , а також нормативне (характеристичне) значення вітрового тиску, які дорівнюють  $t_{\text{сер}} = -5^\circ \text{C}$ ,  $W_0 = 1210,3 (\text{Па})$ .

Знаючи характеристичне значення вітрового тиску та температуру повітря можна знайти закладене в проект значення швидкості вітру. Після математичних перетворень з виразу (2.6) отримаємо  $V_0 \approx 43 (\text{м/с})$ .

Отриманий результат показав, що закладене в проект ОК нормативне значення вітрового тиску відповідає представленому в [31] значенню.

Тепер за формулами (2.1) та (2.3) можна розрахувати граничне та експлуатаційне значення вітрового навантаження на ОК:

$$\left. \begin{aligned} W_m &= 1924 \text{ Па} \\ W_e &= 508 \text{ Па} \end{aligned} \right\}, \quad (2.7)$$

Отримані значення (2.7) будуть використані для порівняльного аналізу з результатами імітаційного моделювання з метою оцінки його точності.



## **2.2 Розробка діагностичних моделей резервуара**

### **2.2.1 Основні поняття діагностичного моделювання**

Більш повне уявлення про вплив динамічних навантажень і реакцію (як лінійну, так і нелінійну) на них об'єкта діагностики можна отримати на основі аналізу його моделі. Термін «модель» широко використовується в різних сферах науки й має безліч смислових значень, але навіть у наш час відсутня єдина термінологія. Тому для запобігання плутанини й непорозуміння надалі необхідно вибрати визначення, яке є найбільш прийнятним.

У [80] під моделлю розуміється спрощене представлення об'єкта/системи, що відбиває його/її найбільш суттєві властивості (з точки зору мети аналізу), елементи та зв'язки, у [81] – будь-який аналог (умовний чи уявний: схема, зображення, опис, креслення, тощо) певного об'єкта, процесу, системи або явища («оригіналу» даної моделі), що використовується як його «замінник». Ще одне значення наведено в [82], яке полягає в тому, що модель – це об'єкт або опис об'єкта, процесу, системи чи явища для заміщення (при певних припущеннях, умовах, гіпотезах) однієї системи (тобто «оригіналу») іншою системою для вивчення «оригіналу» або відтворення будь-яких його властивостей. Найбільш прийнятним для подальшого використання є визначення моделі [83] як деякої реально існуючої системи або такої, що представляється в думках, яка, заміщуючи й відображаючи в пізнавальних процесах іншу систему-оригінал, знаходиться з нею у відношенні подібності, завдяки чому вивчення моделі дає змогу отримати нову інформацію про «оригінал».

Через велике різноманіття визначень терміну «модель» можна привести чимало їх класифікацій. У зв'язку з цим доцільно прийняти найбільш загальну класифікацію, яка наведена в [81].

За способом подання розрізняють абстрактні та реальні моделі. Абстрактні моделі, у свою чергу, поділяються на уявні, символічно-лінгвістичні (або символічні чи лінгвістичні) та наочні.

Уявна модель є основною з абстрактних і зображує ідеальне уявлення людини про навколишній світ. Математична модель є основним видом символічно-лінгвістичної моделі. Вона зображує реальну систему у вигляді математичних співвідношень, які описують процеси або явища, що протікають у системі. Наочна модель подається у вигляді графічних образів чи зображень та поділяються на графічні, анімаційні, просторові.

Реальні моделі поділяються на фізичні і макетні. Вони, на відміну від абстрактних, існують у природі, так як мають хоча б один компонент, який є фізичною копією реального об'єкту.

Фізичні моделі – це реальні об'єкти або їх елементи, які повністю відповідають об'єкту-оригіналу. Основною перевагою використання фізичних моделей є можливість отримувати високу точність і достовірність результатів досліджень, а суттєвим недоліком – їх висока вартість.

Макетні моделі – це реальні об'єкти, які відтворюють основні властивості оригіналу, а також сам оригінал у певному масштабі, який називається масштабом моделювання або коефіцієнтом подібності.

Процес створення, застосування й дослідження моделей називається моделюванням. Через багатозначність терміна «модель» неможливо привести повну класифікацію видів моделювання, але основними з них є [81, 82] комп'ютерне, математичне, фізичне й статистичне.

При фізичному моделюванні об'єкт і його модель являють собою реальні об'єкти або процеси єдиної фізичної природи. За умови наявності відомих критеріїв подібності, що впливають зі схожості фізичних явищ, об'єкт і його модель можуть відображати процеси різної фізичної природи.

Моделювання, що здійснюється за допомогою засобів математики й логіки (включаючи побудову моделі) називається математичним або логіко-математичним.

Потреба статистичної оцінки результатів моделювання виникає за наявності в моделі випадкових факторів та виконується за допомогою методу статистичного моделювання (наприклад, методу Монте-Карло). За результатами статисти-

чного моделювання можна визначити оцінки ймовірнісних загальних і часткових критеріїв якості. Методи статистичного моделювання широко застосовуються при дослідженні складних динамічних систем, наприклад багатоеlementних резервуарів для зберігання екологічно-небезпечних речовин.

Реалізацію та дослідження моделі можна виконати за допомогою комп'ютера. Такий вид моделювання називається комп'ютерним. Воно дає змогу людині-оператору втручатися в процес моделювання та впливати на точність результату завдяки внесенні в модель додаткових уточнень або її спрощенні.

Проте таке визначення комп'ютерного моделювання є досить вузьким, оскільки в наш час комп'ютер використовується майже в усіх інших видах моделювання, навіть при фізичному – для керування процесом моделювання.

Далі під діагностичною моделлю будемо розуміти геометричну комп'ютерну, тобто електронний макет, що визначений у стандарті [84] як «електронна модель виробу, яка описує його зовнішню форму й розміри, дозволяє повністю або частково оцінити його взаємодію з елементами виробничого та/або експлуатаційного оточення, служить для прийняття рішень при розробці виробу і процесів його виготовлення та використання». Тоді комп'ютерне імітаційне моделювання – це послідовність обчислень, що імітують процеси функціонування ОК за умови впливу на його попередньо створену комп'ютерну геометричну модель різних, у тому числі випадкових, факторів, а також візуального відображення результатів.

### **2.2.2 Основні вимоги до розробки геометричних моделей резервуара**

Комп'ютерне геометричне моделювання проводиться за допомогою систем автоматизованого проектування САПР – автоматизованих систем, які реалізують інформаційну технологію виконання функцій проектування та являють собою організаційно-технічні системи, які призначені для автоматизації процесу проектування, що складаються з комплексу програмних, технічних й інших засобів автоматизації діяльності [85-87]. Результат геометричного моделювання – діагнос-

тична модель об'єкта, що містить ті елементи, які є важливими з точки зору постановки діагнозу. Інші елементи, які є важливими для функціонування об'єкта можуть бути виключені з розгляду.

До факторів, які необхідно враховувати при геометричному моделюванні, можна віднести витрати та час, що необхідні для побудови та проведення досліджень. Модель, що є занадто складною для аналізу (рис. 2.2, [88]) є економічно не вигідною та ставить під сумнів можливість проведення досліджень. Тому основним критерієм при виборі геометричної моделі має стати простота аналізу результатів її дослідження за допомогою імітаційного моделювання.

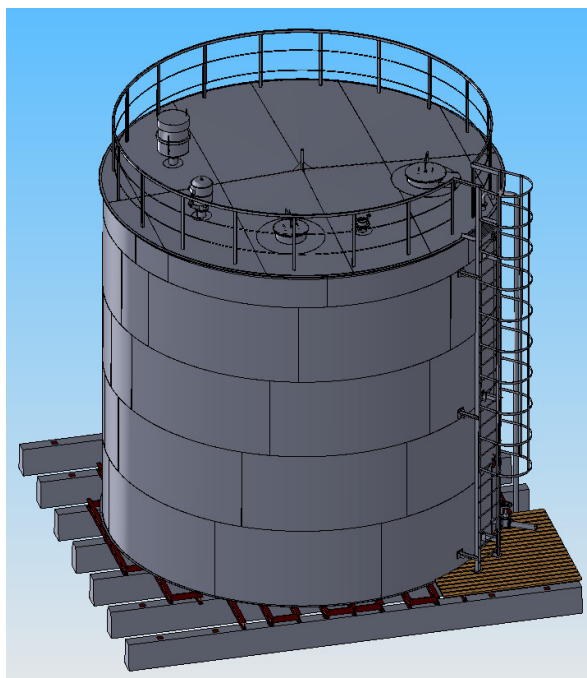


Рисунок 2.2 – Геометрична модель резервуара, яка повністю відповідає реальному резервуару

Для забезпечення простоти аналізу необхідно проводити спрощення занадто складних моделей (наприклад, моделі на рис. 2.2) шляхом прийняття деяких припущень. При цьому повинні задовольнятися наступні вимоги [89]:

- адекватність, тобто відповідність геометричної моделі об'єкту контролю і облік, насамперед, найбільш важливих якостей, зв'язків і характеристик;

- точність, тобто ступінь збігу отриманих у процесі моделювання результатів із заздалегідь встановленими, бажаними. Важливим завданням тут є оцінка потрібної точності результатів і точності вихідних даних, погодження їх, як між собою, так і з точністю своєї моделі. Точність імітаційного моделювання можна оцінити шляхом порівняння його результатів зі значеннями, отриманими, наприклад, аналітичними або експериментальними методами;
- універсальність, тобто застосовність моделі до аналізу ряду однотипних об'єктів в одному або декількох режимах функціонування. Це дозволяє розширити область пошуку рішень;
- доцільна економічність, тобто точність одержуваних результатів і спільність рішення задачі повинні ув'язуватися з витратами на моделювання. Вдалий вибір моделі, як показує практика, – результат компромісу між ресурсами і особливостями моделі ОК.

Вибір моделі і забезпечення точності моделювання вважається однією з найважливіших задач моделювання.

Похибки моделювання зумовлені як об'єктивними причинами, пов'язаними зі спрощенням реальних об'єктів і процесів, так і суб'єктивними – через недоліки знань і навичок, особливості характеру людини-оператора. Похибок можна уникнути, компенсувати їх або врахувати. Завжди обов'язковою є оцінка правильності отриманих результатів. Швидко оцінку часто проводять наступними способами:

- перевіряють відповідність результатів фізичному сенсу (здоровому глузду). Це зручно робити для окремого випадку моделі, коли рішення є очевидним;
- перевіряють виконання окремих очевидних умов завдання, що також дозволяє відсікти неприйнятні рішення;
- перевіряють дотримання тенденції зміни величин і знаків результатів (монотонність, циклічність, плавність і т. п.);

- перевіряють правильність розмірності отриманого результату (якщо робота ведеться з аналітичними залежностями).

Для забезпечення правильності результатів моделювання важливо врахувати наступне:

- точність результатів розрахунків та експериментальних досліджень не може перевищити точності вихідних даних, використовуваних приладів, первинних перетворювачів тощо;
- вид обраної моделі має узгоджуватися з точністю вихідних даних і необхідною точністю результатів;
- бажана точність результатів повинна відповідати практичним завданням.

Необхідно відмітити, що при моделюванні катастрофічного руйнування РВС в [74, 75] використовувалися прості моделі наступної конфігурації:

- плоске дно;
- стінка розбита на пояси наступним чином:
  - перші декілька поясів моделювалися по реальним значенням їх висоти, але усі складові частини поясів об'єднані в один елемент (у рамках кожного поясу);
  - усі інші пояси були об'єднані в один елемент.
- дах, люки, клапани та інші елементи не моделювалися.

Використання моделі резервуару без даху пояснюється в [74, 75] тим, що основне навантаження від рідини сприймають дно та стінка.

При моделюванні сейсмічного впливу на РВС в [76-78] також використовувалися прості моделі наступної конфігурації:

- плоске дно;
- стінка об'єднана в один елемент;
- дах об'єднаний в один елемент;
- люки, клапани та інші елементи не моделювалися.

Це означає, що при дослідженні можна використовувати досить прості моделі, але через розходження в конструкції та типі аналізу необхідно додатково

оцінити та проаналізувати вплив окремих елементів обраного ОК на результат у цілому.

Тому для оцінки впливу елементів конструкції на результати імітаційного моделювання необхідно побудувати ряд геометричних моделей у вигляді складальних одиниць різної складності.

### 2.2.3 Побудова спрощених моделей

Побудова спрощених моделей зумовлена необхідністю отримання вихідних даних для аналізу, визначення та порівняння впливу окремих елементів конструкції ОК на результати моделювання. Для їх побудови прийнято наступні припущення:

- зв'язок між зовнішнім та внутрішнім резервуаром відсутній, тобто навантаження на зовнішній резервуар не впливають на внутрішній;
- дах, стінка та дно об'єднані в єдиний елемент;
- жорсткість зовнішнього резервуара рівна загальній жорсткості об'єкта;
- дах, стінка та дно об'єднані, тобто ОК приймається повністю одноелементним.

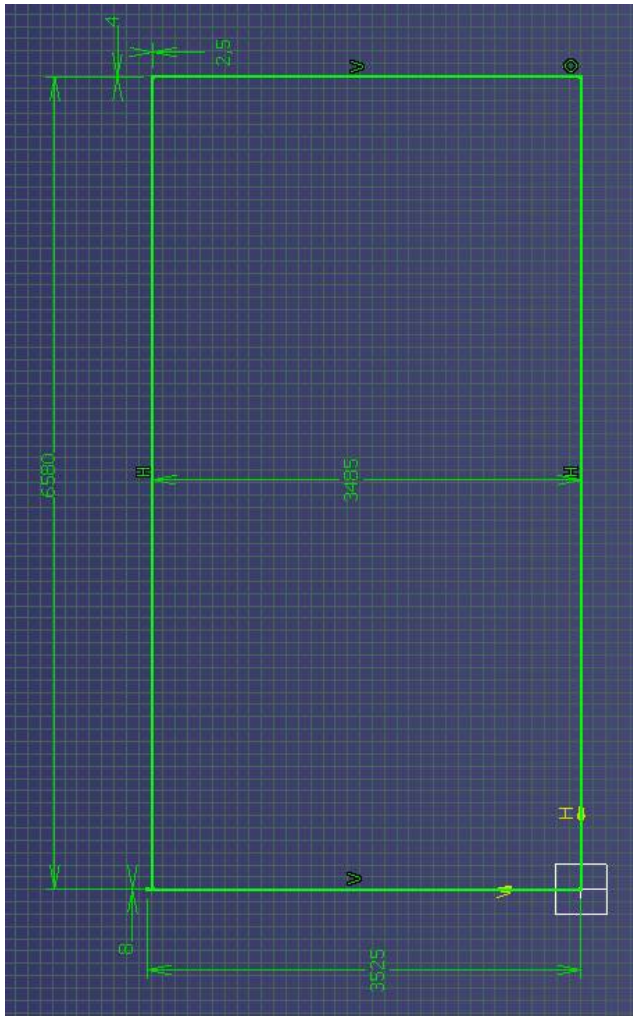
Отже, з урахуванням того, що зв'язок між зовнішнім (захисним) та внутрішнім резервуарами відсутній, для проведення досліджень достатньо побудови моделі тільки зовнішнього резервуара. Спрощені моделі, завдяки прийнятим припущенням, будуються з використанням лише одного ескізу (рис. 2.3), а саме за допомогою його обертання навколо осі Н на  $180^\circ$ . У результаті були отримані геометричні моделі з плоским та конічним дахом.

За даними креслень величина конусності складає  $1/20$  радіуса даху, тому для побудови відповідної моделі необхідно розрахувати висоту прямого конуса за наступною формулою:

$$h_k = \frac{1}{20} \cdot R_d,$$

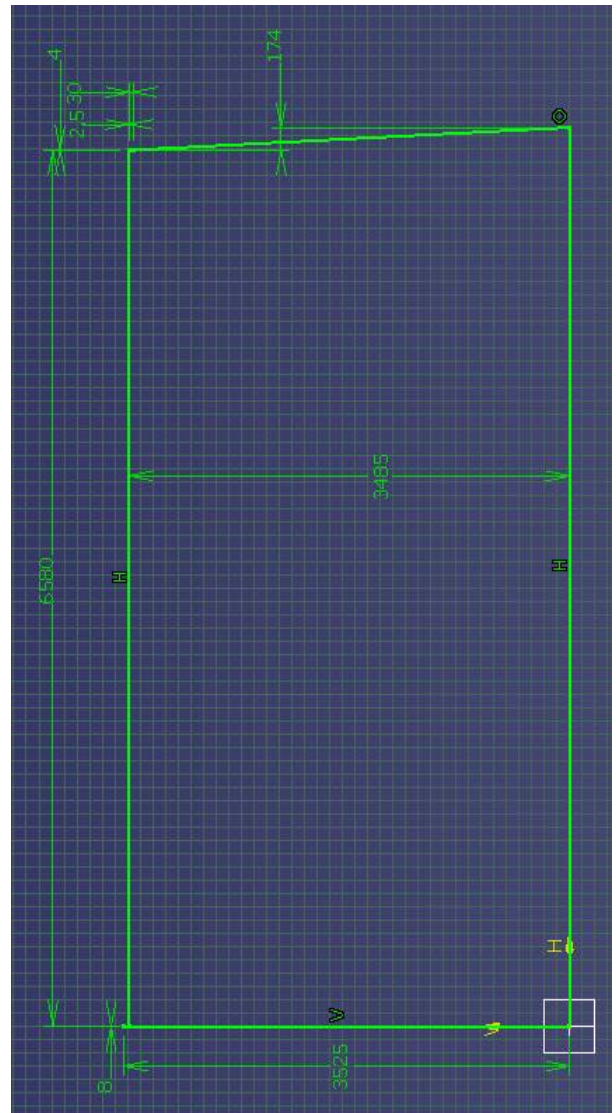
де  $h_k$  – висота прямого конуса, мм;  $R_d$  – радіус даху захисного резервуара, мм.

З урахуванням розмірів (Додаток Б) отримаємо  $h=174$  мм. Розбіжність використаної величини радіуса даху 3482,5 мм та реальної 3430 мм пов'язана з прийнятими припущеннями.



а)

а) з плоским дахом;



б)

б) з конічним дахом.

Рисунок 2.3 – Ескіз зовнішнього резервуару

За ескізом також побудовано майданчик, який відповідає плоскій рівнини без перешкод (тип місцевості I, [19]), для спрощення розташування моделей у просторі. На рис. 2.4 показана його довжина (уздовж осі Н) та ширина (уздовж



осі V) у мм. Даний майданчик слугує лише для орієнтації об'єктів і не приймає участі в імітаційному моделюванні, тому його висоту можна обрати довільною.

Проте для моделювання впливу повітряного тиску на ОК не достатньо вищеописаних моделей. Необхідним елементом має бути саме повітряне середовище, модель якого побудована з тими ж параметрами ширини та довжини, що зображені на рис. 2.4, але іншою висотою, що складає 30 м. Для приведення цієї моделі до остаточної форми необхідно скористатися засобами, які реалізовані в модулі створення складальних одиниць програми геометричного моделювання CATIA.

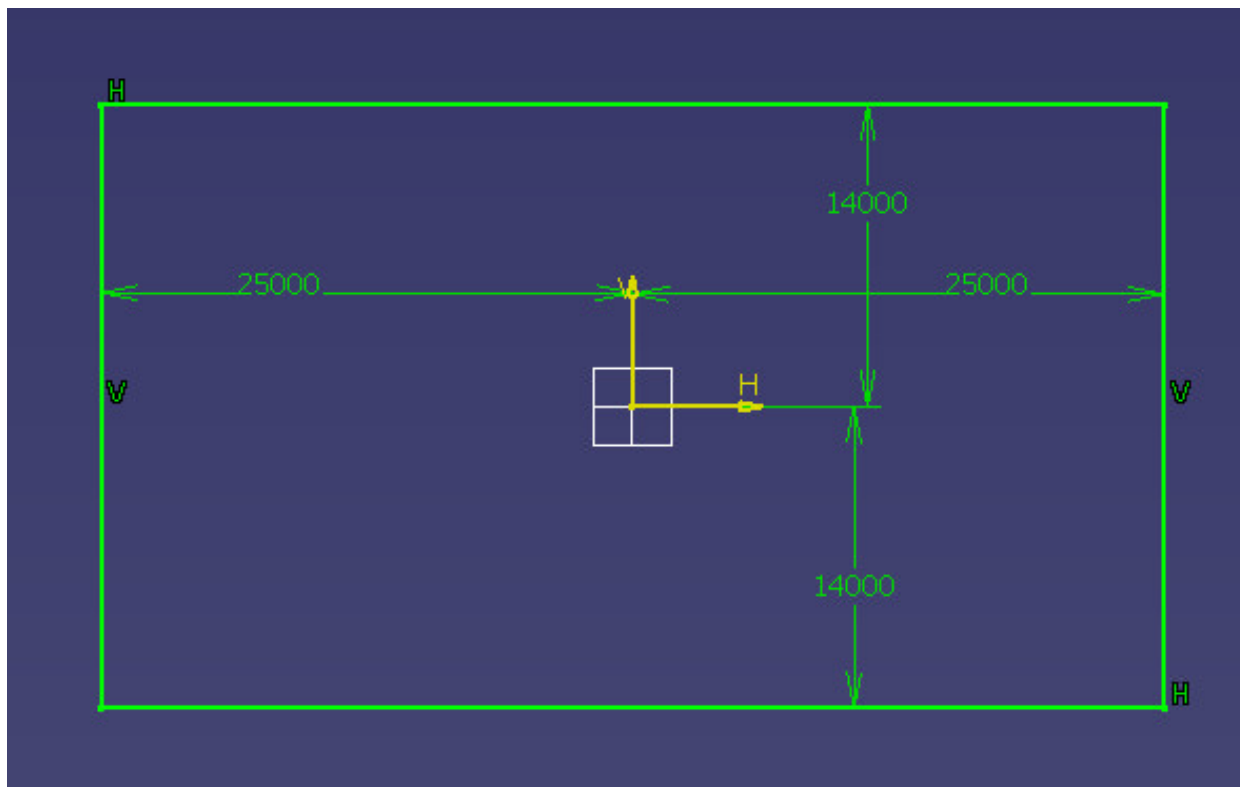


Рисунок 2.4 – Ескіз майданчика

Для точності взаємного розташування елементів використовувалися прив'язки типу «Coincidence» (збіг), «Contact» (контакт) та «Angle» (кут). Після компоновки за допомогою функції «Remove» було видалено об'єм резервуара з моделі повітряного середовища. Кінцевий варіант складальної одиниці зображено на рис. 2.5.

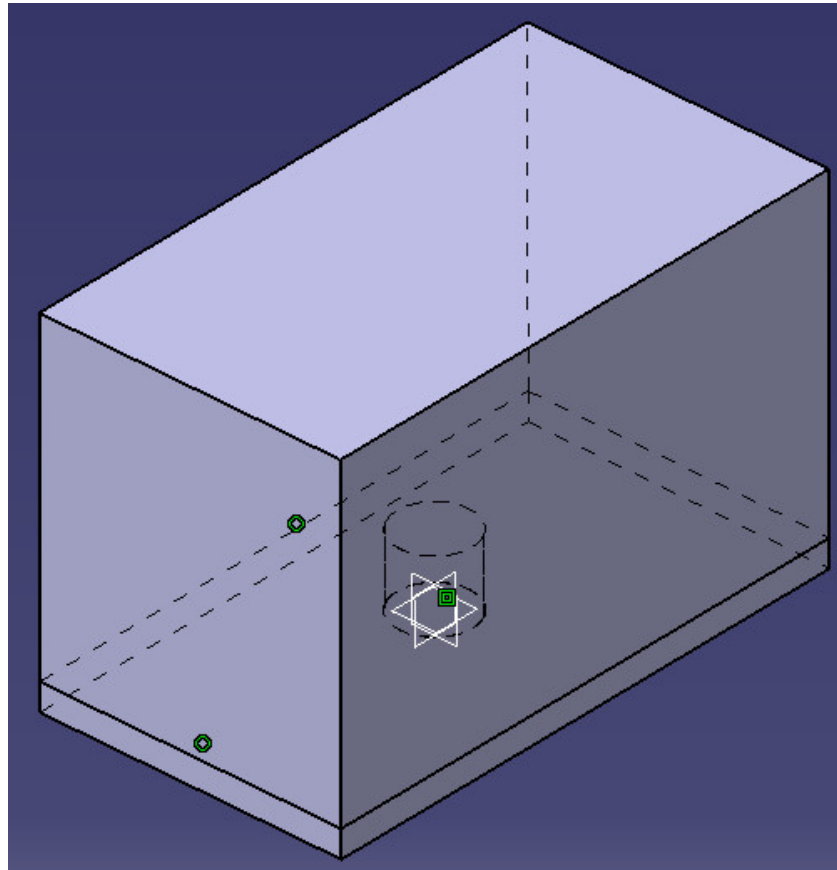


Рисунок 2.5 – Складальна одиниця геометричних моделей з відображенням невидимих ребер

#### 2.2.4 Побудова ускладнених моделей

Реальні об'єкти мають конструктивні елементи, які можуть мати значний вплив на результати дослідження характеру розподілу повітряного потоку по ОК. Серед них розглянемо основні, а саме: фундамент зі сталевим каркасом та повітряні дихальні клапани.

У сучасній будівельній практиці використовується велика кількість типів фундаментів під резервуари. Вибір найбільш раціонального типу залежить від об'єму резервуара і конкретних інженерно-геологічних умов. Згідно з [90, 91] фундаменти резервуарів діляться на:

- природні (грунти, які мають достатній опір стисненню, за умови, що їх деформації під дією навантаження, що передається від споруди, не перевищуватимуть граничних значень);

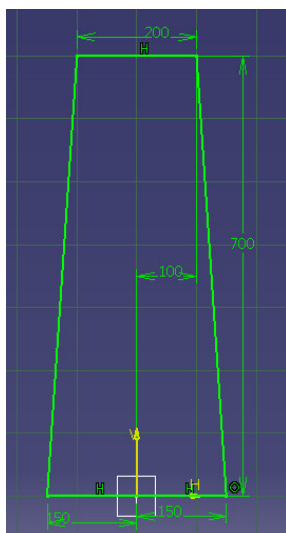
- кільцеві (із залізобетонним кільцем під стінкою);
- пальові часто застосовуються на майданчиках, складених слабкими грунтами;
- інші конструкції фундаментів при будівництві резервуарів у складних геологічних умовах.

Часто фундамент резервуара являє собою горизонтальні залізобетонні бруси трапецієдальної форми, а каркас, у свою чергу, складається з двотаврів, які розташовані поперек фундаменту та з'єднані між собою сталевими пластинами.

Для побудови геометричних моделей фундаменту та сталевих пластин прийнято наступні спрощення:

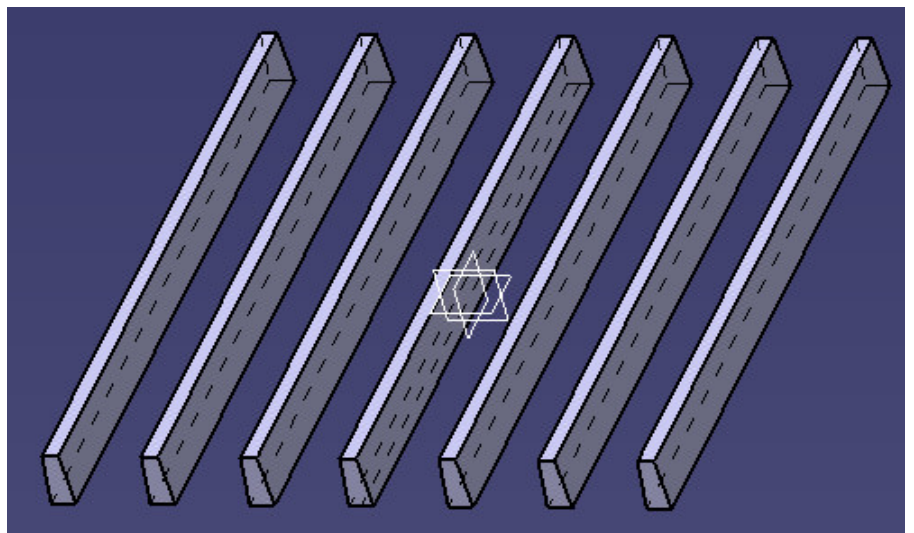
- параметри трапеції (рис. 2.6,а);
- округлення ребер двотаврів не враховувалося (рис. 2.7,а);
- з'єднувальні пластини каркасу прямокутної форми (рис. 2.7,б) та не торкаються дна резервуара;
- сталевий каркас симетричний відносно площин його побудови.

Геометричні моделі фундаменту та сталевих пластин наведено відповідно на рис. 2.6 та рис. 2.8.



а)

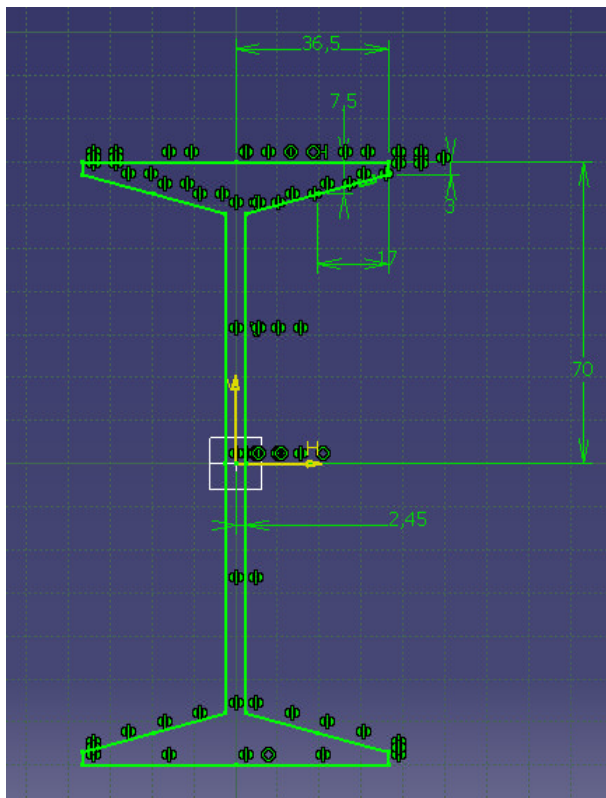
а) ескіз;



б)

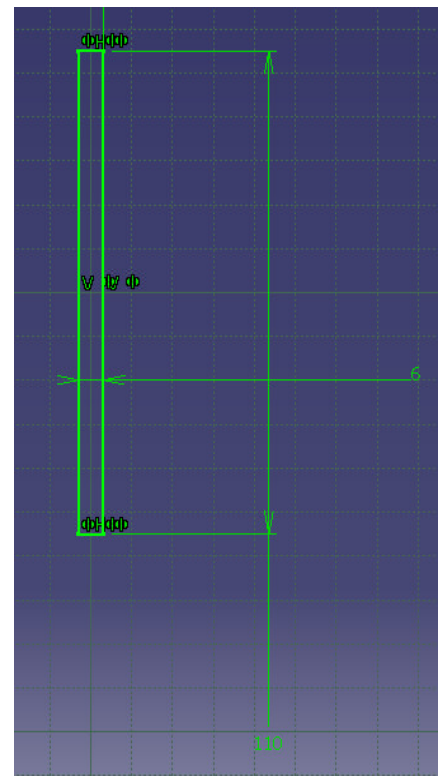
б) кінцева модель.

Рисунок 2.6 – Побудова моделі фундаменту



а)

а) двотавр;



б)

б) з'єднувальна пластина.

Рисунок 2.7 – Ескізи елементів сталевого каркасу

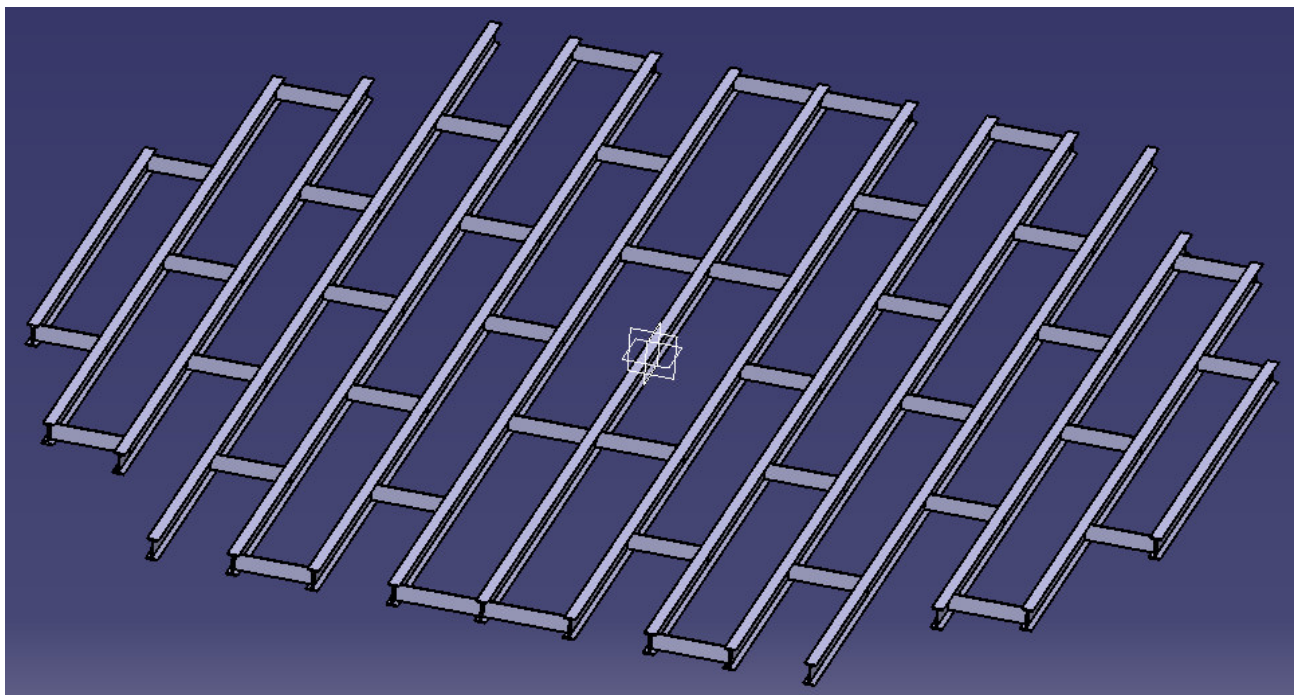


Рисунок 2.8 – Геометрична модель сталевого каркасу



Наступними елементами, геометричну модель яких необхідно побудувати, є повітряні дихальні клапани, фотографії яких зображені на рис. 2.9.



а)

а) клапан КПГ-100;



б)

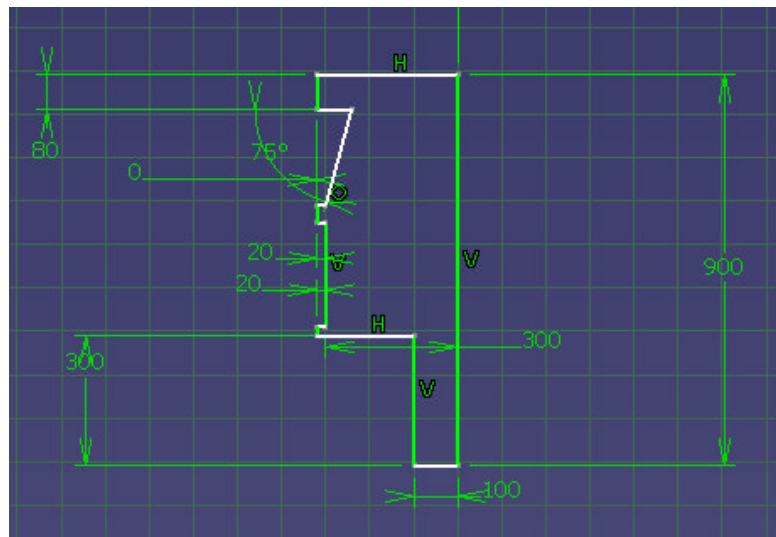
б) клапан НДКМ-100.

Рисунок 2.9 – Фотографії повітряних дихальних клапанів

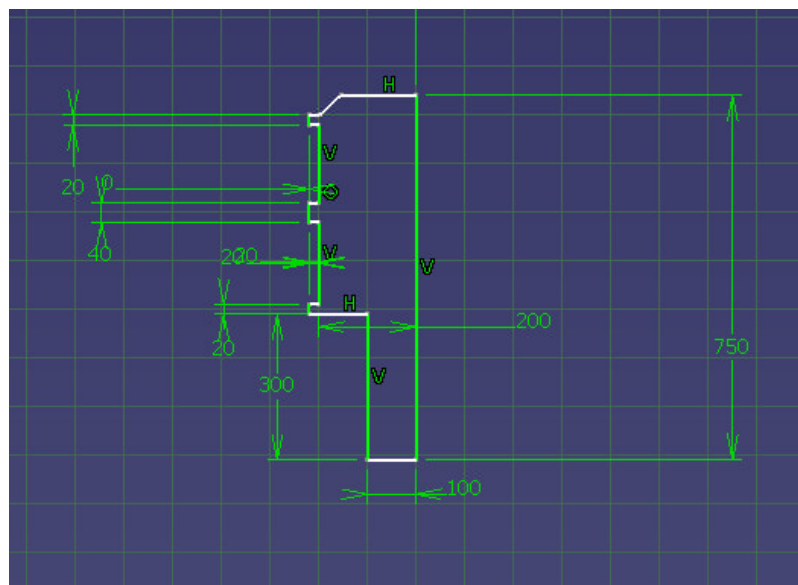
Для їх побудови використовувалися наступні спрощення:

- ескізи (рис. 2.10) побудовані по кресленням, наведеним в [88];
- незначні елементи конструкції не враховані;
- на даху резервуара моделі клапанів розміщені згідно з [88].

Кінцеві геометричні моделі повітряних дихальних клапанів отримані шляхом обертання їх ескізів навколо вертикальної осі. Побудовані моделі розміщені на даху РВС з плоским дахом (рис. 2.11) у відповідності до креслень ОК (Додаток Б). Таке розташування повітряних дихальних клапанів дає змогу отримати більш точний результат розподілу вимірюваної величини в межах розрахункової області.



а)



б)

а) клапан КПГ-100;

б) клапан НДКМ-100.

Рисунок 2.10 – Ескізи повітряних дихальних клапанів

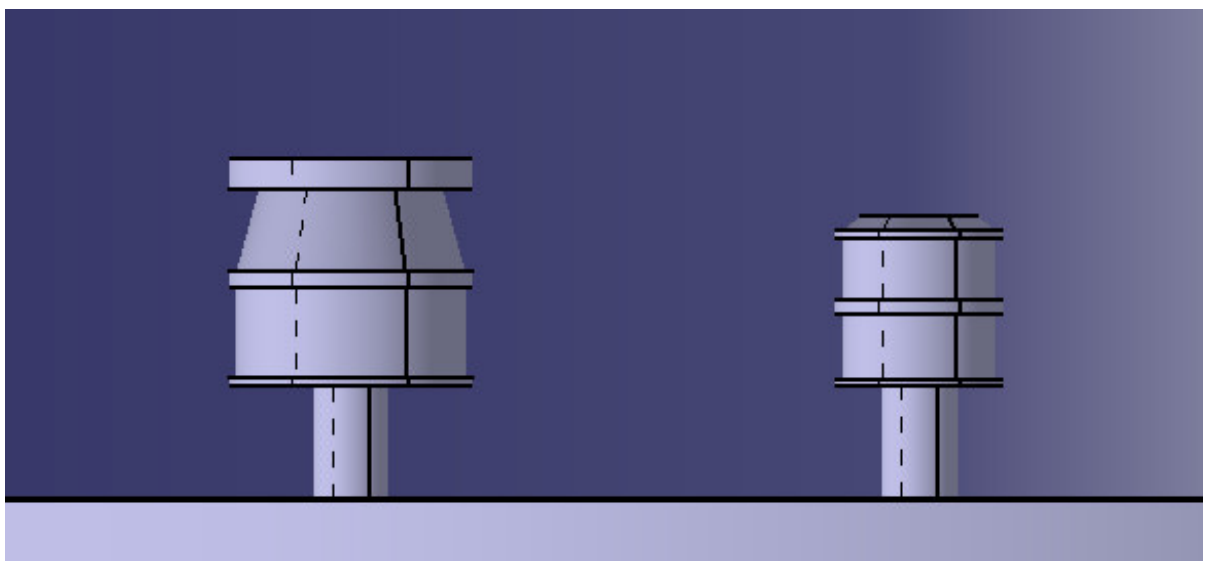


Рисунок 2.11 – Геометричні моделі повітряних дихальних клапанів

Таким чином, було створено шість основних геометричних моделей РВС для дослідження, які відрізняються такими характерними особливостями:

- модель №1 – плоский дах, фундамент та повітряні дихальні клапани відсутні;
- модель №2 – конічний дах, фундамент та повітряні дихальні клапани відсутні;
- модель №3 – плоский дах, фундамент під кутом  $90^\circ$  до вектору швидкості, повітряні дихальні клапани відсутні;
- модель №4 – плоский дах, фундамент під кутом  $0^\circ$  до вектору швидкості, повітряні дихальні клапани відсутні;
- модель №5 – плоский дах, повітряні клапани під кутом  $90^\circ$  до вектору швидкості, фундамент відсутній;
- модель №6 – плоский дах, повітряні клапани під кутом  $0^\circ$  до вектору швидкості, фундамент відсутній.

Розроблені геометричні моделі будуть використані у дослідженнях впливу вітрового навантаження на РВС.

### **2.3 Оцінка впливу елементів конструкції резервуара на характер розподілу вітрового навантаження**

На основі імітаційного моделювання можна провести аналіз об'єкта будь-якої складності з урахуванням зовнішніх впливів та зі збереженням умов відповідності між процесами і явищами, що моделюються, та процесами і явищами, що протікають в об'єкті. Таким чином, імітаційне моделювання дозволяє дослідити функціонування об'єкта в реальних умовах експлуатації та визначити його реакцію на зовнішні впливи (наприклад, вітрове навантаження) з метою виявлення найбільш небезпечних зон концентрації напружень або умов втрати несучої здатності конструкції.

Для математичного моделювання впливу вітрового навантаження на об'єкти використовуються рівняння Нав'є-Стокса, які разом з рівнянням нероз-

ривності являються фундаментальними рівняннями механіки рідини та газу [92, 93]. Для розрахунку складних рухів рідини й газу, що супроводжуються додатковими фізичними явищами, такими, як: турбулентність; контактні границі поділу; горіння; теплоперенос; пористість середовища і так далі, – необхідно використовувати додаткові диференціальні рівняння, які описують дані явища. Набори таких співвідношень у сукупності з рівняннями Нав'є-Стокса є математичними моделями гідрогазодинаміки. Рівняння Нав'є-Стокса у векторній формі мають наступний вигляд [94]:

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + (\vec{U} \cdot \nabla) \cdot \vec{U} = \vec{F} - \frac{1}{\rho} \text{grad} p + \nu \cdot \Delta \vec{U},$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \rho \vec{U} = 0,$$

де  $\vec{U}$  – вектор швидкості;  $\vec{F}$  – вектор масової сили у відношенні до одиниці маси;  $\rho$  – щільність;  $p$  – тиск;  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості ( $\mu$  – коефіцієнт динамічної в'язкості);  $\nabla$  – оператор набла;  $\Delta$  – векторний оператор Лапласа.

При відсутності масових сил та  $\rho = \text{const}$  вищевказані рівняння можна записати у вигляді

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + (\vec{U} \cdot \nabla) \cdot \vec{U} = -\frac{1}{\rho} \text{grad} p + \nu \cdot \Delta \vec{U},$$

$$\text{div} \vec{U} = 0.$$

У програмних комплексах скінчено-елементного аналізу (імітаційного моделювання) ANSYS та FlowVision найбільш повно представлені наступні моделі [94]:

- наближення Буссинеска (малі зміни щільності) для опису ламінарної течії в'язкої рідини при малих числах Рейнольдса;



- k-ε модель турбулентної течії в'язкої рідини з невеликими змінами щільності при великих числах Рейнольдса;
- модель рідини, що слабо стискається, яка дозволяє розраховувати стаціонарну дозвукову течію газу при будь-яких змінах щільності;
- модель рідини, що повністю стискається (у термінології FlowVision): стаціонарна і нестаціонарна течія при будь-яких числах Маха (до-, транс-, понад- і гіперзвукові течії).

Для того, щоб серед них виділити необхідну модель потрібно визначити число Рейнольдса [19]:

$$Re = 0,88 \cdot d \cdot \sqrt{W_0 \cdot k(z) \cdot \gamma_{fm}} \cdot 10^5, \quad (2.8)$$

де  $d$  – діаметр резервуара, м;  $k(z)$  – висота резервуара, м.

З урахуванням попередніх даних, отримаємо  $Re=691 \cdot 10^5$ . Враховуючи число Рейнольдса, для імітаційного моделювання можна обрати стандартну k-ε модель.

Імітаційне моделювання впливу вітрового навантаження при критичних умовах експлуатації ОК (швидкість повітряного потоку 75 м/с, [95, 96]) проходило в програмному комплексі FlowVision.

Для спрощення аналізу будемо розглядати результати у таких площинах:

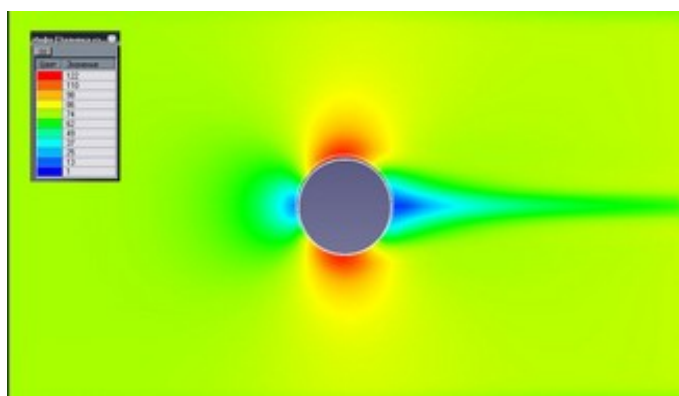
- у горизонтальній площині XZ, яка проходить через повітряне середовище на висоті 3 м від землі;
- у вертикальній площині XY (де X – вісь, уздовж якої направлений вектор швидкості повітряного потоку; Y – вертикальна вісь), яка співпадає з відповідною площиною симетрії повітряного середовища кожної моделі;
- на рисунках буде зазначатися площина, в якій аналізуються результати досліджень. При цьому напрямок дії повітряного потоку на них завжди зліва-направо.

Для кожної геометричної моделі резервуара результати моделювання представимо як:

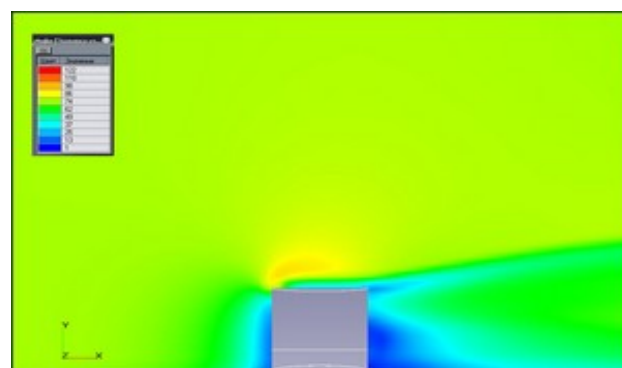
- графічний (якісний показник), що дозволяє візуально оцінити характер розподілу тиску та швидкості повітряного потоку в межах розрахункової області; у якості такого показника використовуємо поля тиску та поля швидкостей повітряного потоку;
- чисельний (кількісний показник), що дає кількісну характеристику обраних параметрів, яку можна порівнювати з результатами аналітичних розрахунків; у якості такого показника використовуємо значення максимального тиску на стінках резервуара та максимальну швидкість повітряного потоку у розрахунковій області імітаційної моделі.

Якісні результати дослідження моделі №1 зображені на рис. 2.12 та рис. 2.13, кількісні результати дослідження складають: максимальний тиск  $P=3954$  Па, максимальна швидкість  $V=120$  м/с.

Для моделі №2 (рис. 2.14 та рис. 2.15) порівняння якісних показників з результатами дослідження моделі №1 показало практично повну ідентичність. Це дає підстави стверджувати, що конусність даху (1/20) не впливає на обтікання ОК повітряним потоком. Це підтверджують і кількісні значення досліджуваних параметрів: максимальний тиск  $P=3954$  Па, максимальна швидкість  $V=120$  м/с.

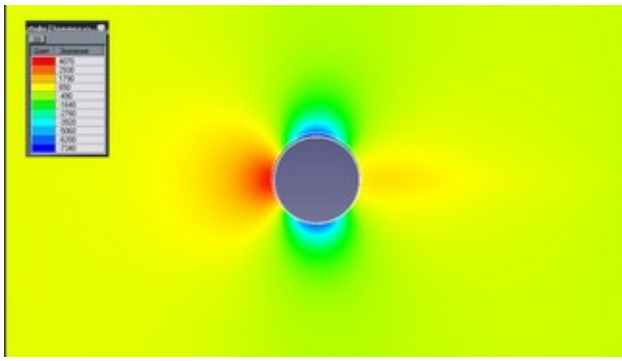


а)  
а) XZ



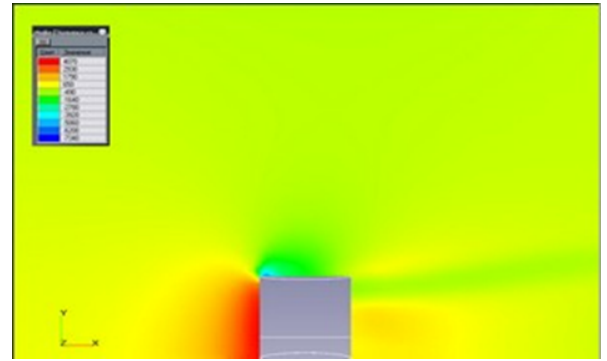
б)  
б) XY

Рисунок 2.12 – Поля швидкостей повітряного потоку моделі №1, отримані в площині



а)

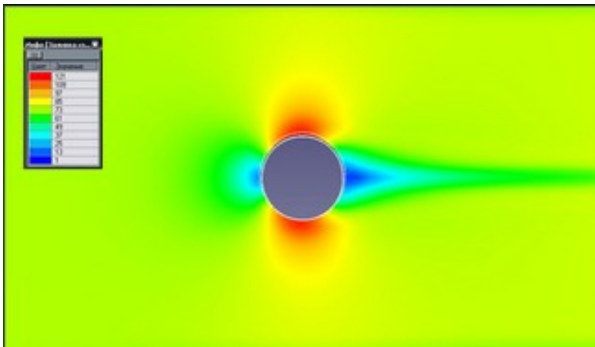
а) XZ



б)

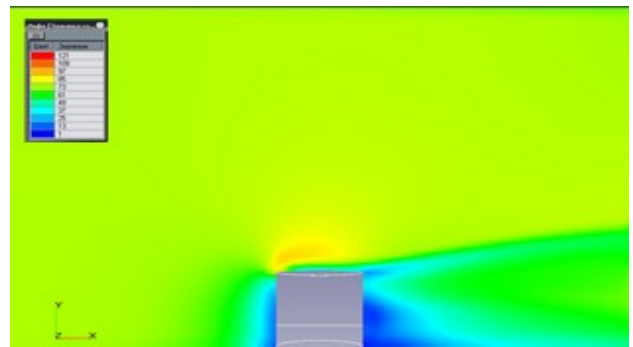
б) XY

Рисунок 2.13 – Поля тиску повітряного потоку моделі №1, отримані в площині



а)

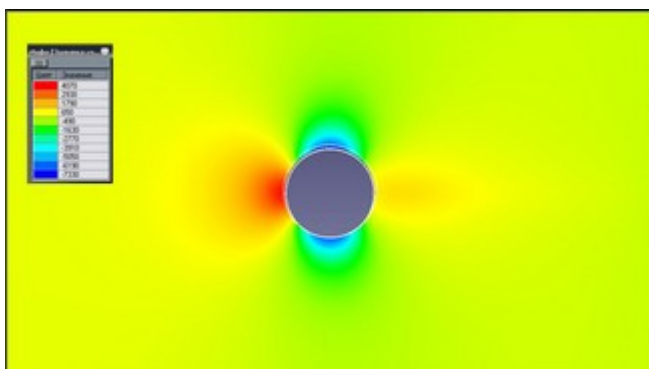
а) XZ



б)

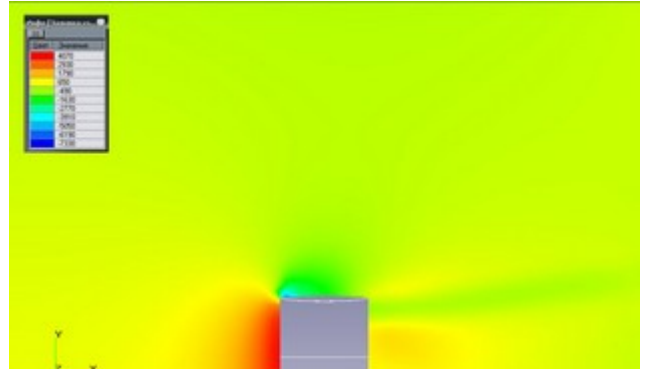
б) XY

Рисунок 2.14 – Поля швидкостей повітряного потоку моделі №2, отримані в площині



а)

а) XZ



б)

б) XY

Рисунок 2.15 – Поля тиску повітряного потоку моделі №2, отримані в площині

Результати моделювання з використанням моделі №3 наведено на рис. 2.16 та рис. 2.17. Зміни результатів відбуваються в обох площинах аналізу – XZ та XY. Як видно з наведених рисунків, наявність фундаменту вносить суттєві відмінності у результати розподілу тиску та швидкості повітряного потоку (порівняно з моделлю №1). Чисельні значення параметрів також значно відрізняються: максимальний тиск  $P=4231$  Па, максимальна швидкість  $V=112$  м/с.

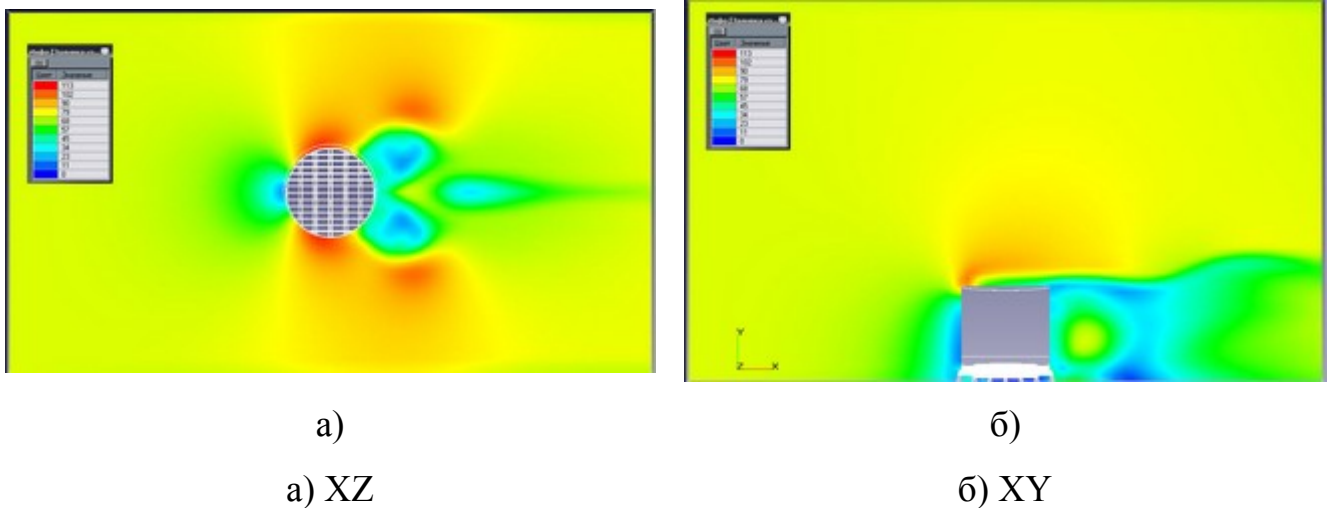


Рисунок 2.16 –Поля швидкостей повітряного потоку моделі №3, отримані в площині

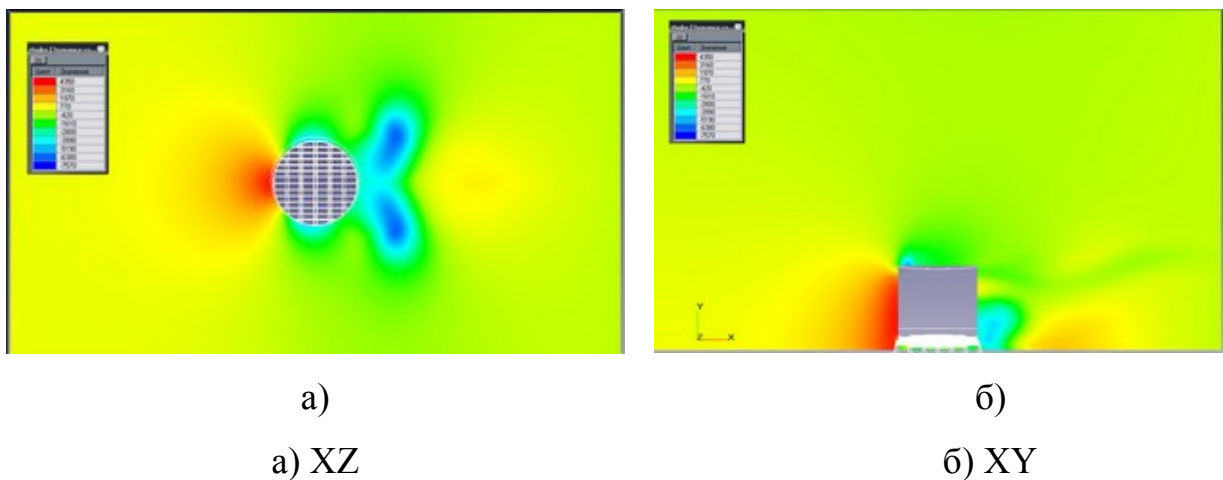
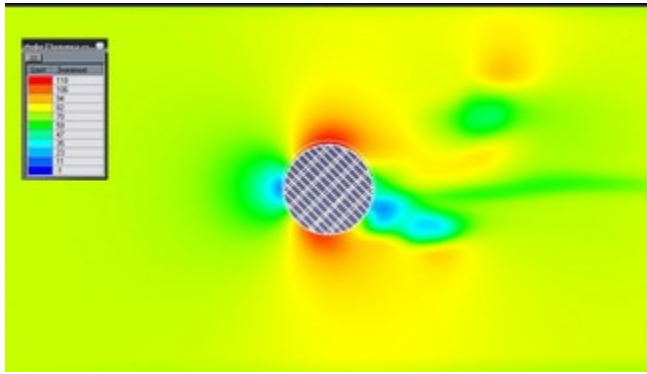


Рисунок 2.17 – Поля тиску повітряного потоку моделі №3, отримані в площині

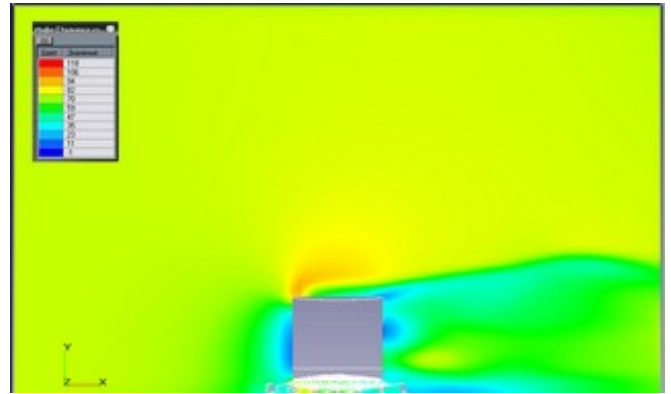
Для моделі №4 (рис. 2.18 та рис. 2.19), як і в попередньому випадку, результати відображають вплив наявності фундаменту порівняно з вихідною мо-

деллю №1. Значною відмінністю є втрата відносної симетричності розподілу швидкості та тиску в горизонтальній площині розрахункової області (рис. 2.18,а та рис. 2.19,а). Кількісні показники мають такі значення: максимальний тиск  $P=4069$  Па, максимальна швидкість  $V=116$  м/с.



а)

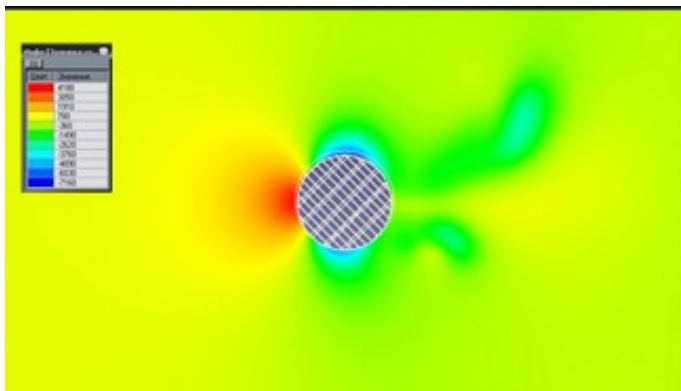
а) XZ



б)

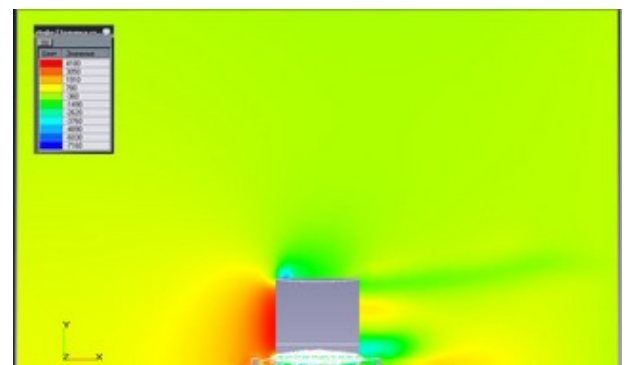
б) XY

Рисунок 2.18 – Поля швидкостей повітряного потоку моделі №4, отримані в площині



а)

а) XZ



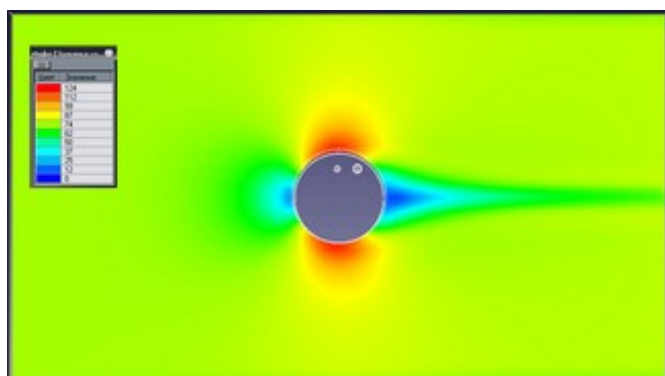
б)

б) XY

Рисунок 2.19 – Поля тиску повітряного потоку моделі №4, отримані в площині

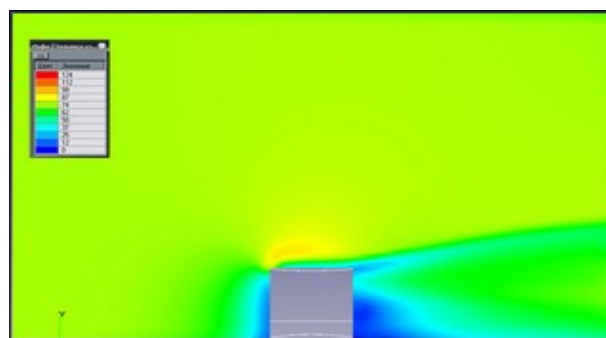
Дослідження моделі №5 (рис. 2.20 та рис. 2.21) та моделі №6 (рис. 2.22 та рис. 2.23) показали, що ускладнення геометричної моделі ОК шляхом введення

повітряних дихальних клапанів не призвело до значних змін результатів у порівнянні з вихідною моделлю №1. Чисельні значення параметрів для моделі №5 наступні: максимальний тиск  $P=3971$  Па, максимальна швидкість  $V=120$  м/с. Кількісні показники для моделі №6 наступні: максимальний тиск  $P=3990$  Па, максимальна швидкість  $V=121$  м/с.



а)

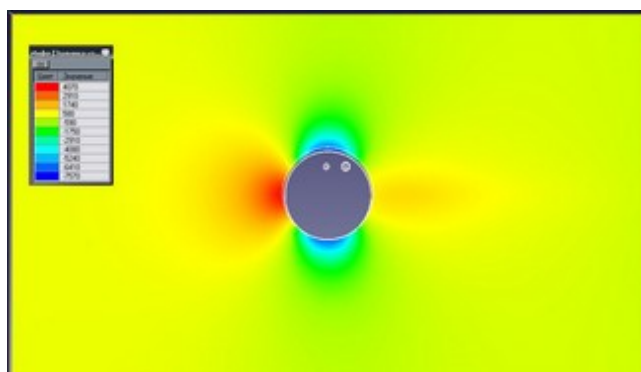
а) XZ



б)

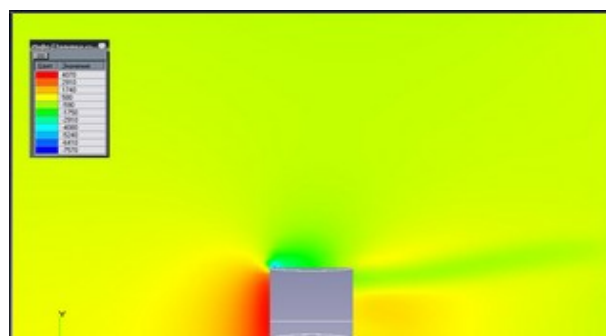
б) XY

Рисунок 2.20 – Поля швидкостей повітряного потоку моделі №5, отримані в площині



а)

а) XZ



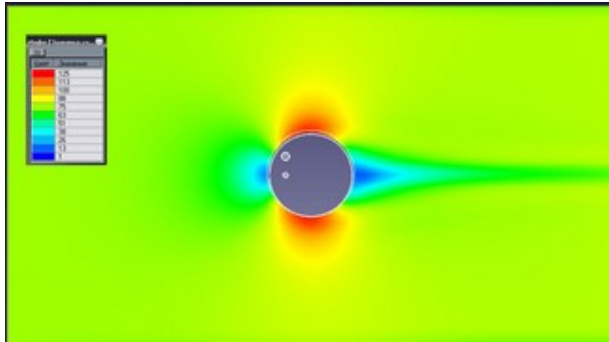
б)

б) XY

Рисунок 2.21 – Поля тиску повітряного потоку моделі №5, отримані в площині

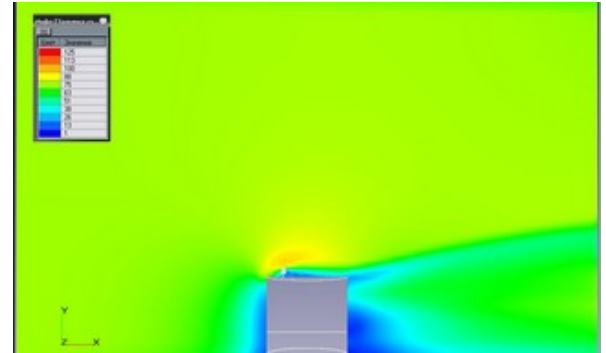
Аналіз отриманих у результаті моделювання якісних показників впливу елементів моделі на характер розподілу вітрового навантаження по ОК показав,

що вагомі зміни розглянутих параметрів (тиску та швидкості повітряного потоку) у межах розрахункової області викликані додаванням до вихідної моделі №1 фундаменту зі сталевим каркасом. Додаткові конструктивні елементи на даху (повітряні дихальні клапани, тощо) не вносять суттєвих відмінностей у результати моделювання (порівняно з моделлю №1) тому ними у даних дослідженнях можна знехтувати.



а)

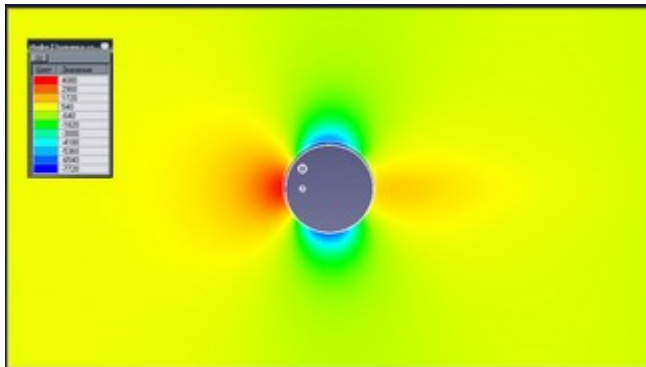
а) XZ



б)

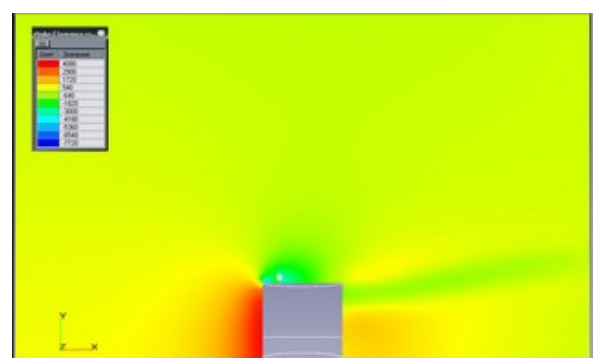
б) XY

Рисунок 2.22 – Поля швидкостей повітряного потоку моделі №6, отримані в площині



а)

а) XZ



б)

б) XY

Рисунок 2.23 – Поля тиску повітряного потоку моделі №6, отримані в площині

Кількісні значення, отримані під час дослідження, добре узгоджуються між собою та з якісною оцінкою характеру розподілу вітрового навантаження по ОК,

що добре видно з рис. 2.24 та рис. 2.25, які відображають усі чисельні результати імітаційного моделювання для спрощення подальшого аналізу.

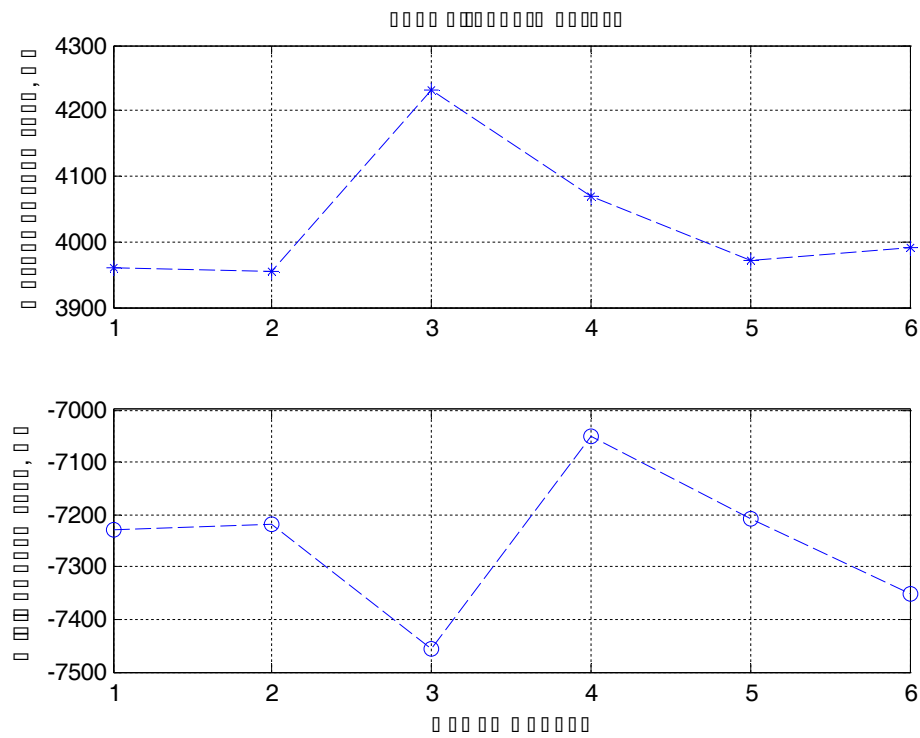


Рисунок 2.24 – Залежність тиску від обраної геометричної моделі

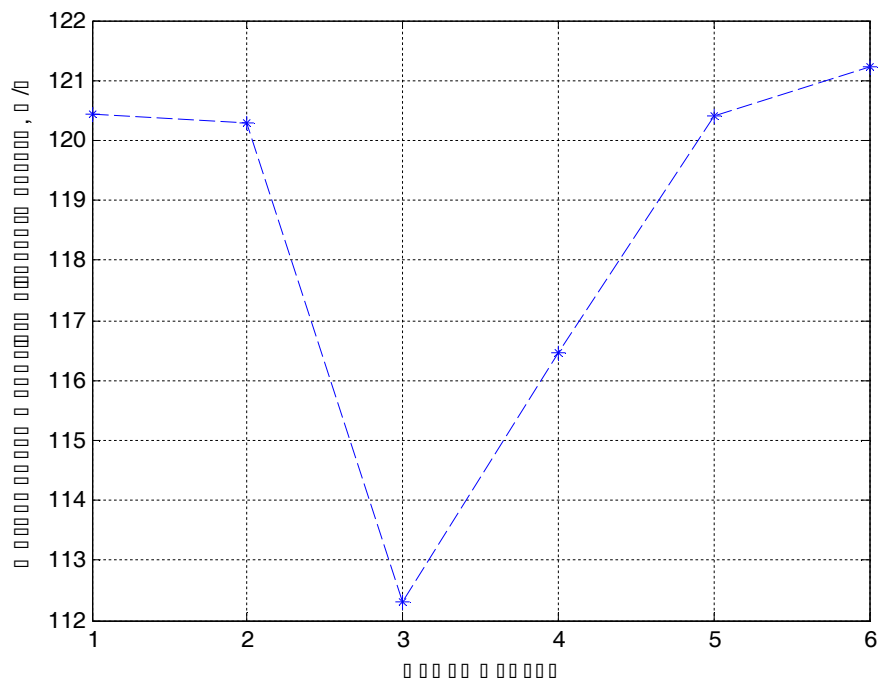


Рисунок 2.25 – Залежність швидкості повітряного потоку від обраної геометричної моделі



Проаналізувавши графік, зображений на рис. 2.24, можна зробити висновок, що конфігурація моделі №3 має найбільший вплив на результати імітаційного моделювання. Проте не слід нехтувати значеннями мінімального тиску, адже в таких областях деформації резервуара можуть бути навіть більшими. Отже, крім моделі №3 потрібно розглянути модель №4.

## 2.4 Вибір геометричної моделі для подальших досліджень

Як було показано раніше, розглядаючи тиск повітряного потоку як основну характеристику вітрового навантаження, за результатами моделювання необхідно проаналізувати моделі №3 та №4, які мають значні розходження у порівнянні з вихідною моделлю №1. Іншим критерієм оцінки являється максимальна швидкість повітряного потоку в межах розрахункової області імітаційної моделі. Представлений на рис. 2.25 графік дає змогу визначити, що всі моделі крім №3 та №4 мають досить близькі результати.

Для оцінки цих двох моделей необхідно проаналізувати розташування ОК на місцевості [29, 88], а також напрямки та силу вітру в місці його установки (рис. 1.4). Для досліджуваного прикладу ОК найсильніші вітри діють у північному та південному напрямках, що приблизно відповідає умовам дослідження моделі №4, яку обираємо для подальшого аналізу.

Для перевірки точності отриманих результатів проведено моделювання при закладеній у проект ОК [78] швидкості повітряного потоку з використанням вихідної моделі №1, у результаті чого було отримано значення максимального тиску 1339 Па. Розрахуємо абсолютну та відносну похибки визначення величини характеристичного значення вітрового навантаження при імітаційному моделюванні. Абсолютна похибка в одиницях вимірюваної величини визначається за наступною формулою:

$$\Delta = |x - x_{\text{mod}}|, \quad (2.9)$$

де  $x$  – дійсне значення вимірюваної величини;  $x_{\text{mod}}$  – значення вимірюваної величини, отримане шляхом моделювання, а відносна похибка – за формулою:

$$\delta = \frac{\Delta}{x} \cdot 100\% . \quad (2.10)$$

Підставивши відповідні значення у формули (2.9) та (2.10), отримаємо  $\Delta = 128,7$  Па,  $\delta = 10,63\%$ .

Як видно, відносна похибка досить значна, тому потрібно виявити фактори, які впливають на значення вимірюваної величини (тиску та швидкості вітру). Аналіз коефіцієнтів, які відсутні в аналітичному розрахунку, та ряд додаткових імітаційних моделювань показали, що значною мірою на дану похибку впливає вектор гравітації. Якщо його виключити з розрахунку (тобто задати нульовим), значення максимального тиску при тій же швидкості повітряного потоку становитиме 1231 Па. Якщо повторно розрахувати похибки, то з даним значенням тиску отримаємо  $\Delta^* = 20,7$  Па,  $\delta^* = 1,71\%$ .

Одержаний результат підтверджує те, що в результаті моделювання без урахування вектора гравітації результат співпадає з аналітичним розрахунком. Для оцінки поведінки об'єкта в реальних умовах експлуатації необхідно обов'язково враховувати вектор гравітації, так як він уточнює результат аналітичного розрахунку на 10,6 %.

Таким чином, для подальших досліджень будемо використовувати модель №4, а моделювання виконувати з урахуванням вектора гравітації.

## 2.5 Аналіз вітрового навантаження при різних швидкостях вітру

Модель №4 є основною геометричною моделлю для подальших досліджень, тому визначимо та проаналізуємо вплив на неї повітряного потоку різної швидкості. У ході аналізу розглянемо лише поля швидкості моделі №4 (рис. 2.18,

а; рис. 2.26; рис. 2.27) при швидкостях повітряного потоку 25 м/с, 45 м/с, а також 75 м/с (останнє значення використовувалось у попередніх моделюваннях).

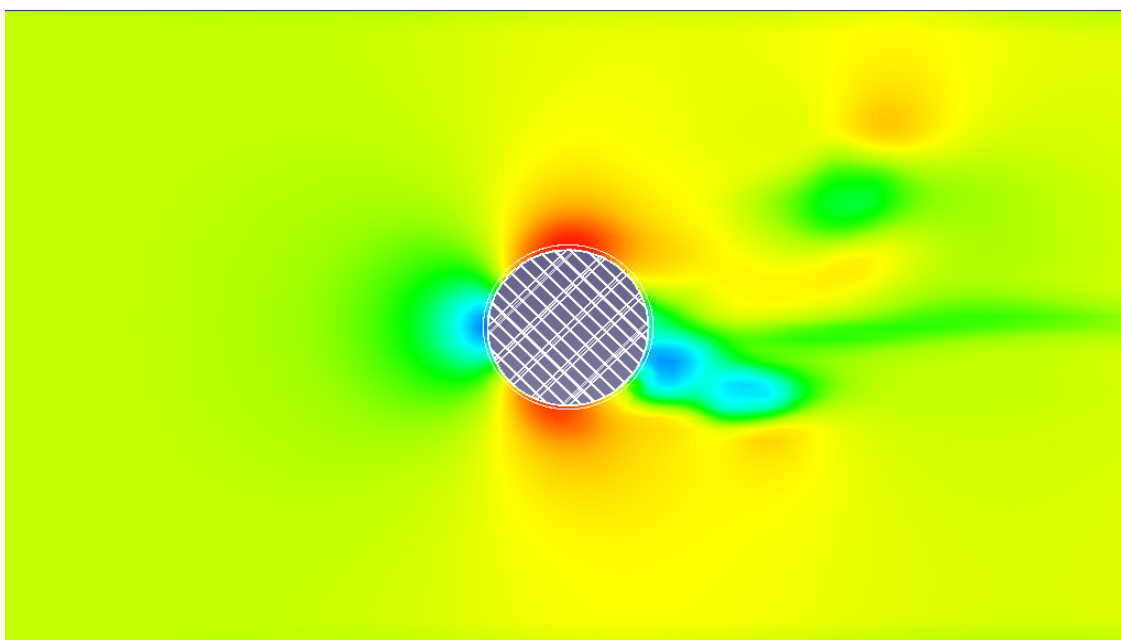


Рисунок 2.26 – Поле швидкості моделі №4 в площині XZ,  $V=45$  м/с

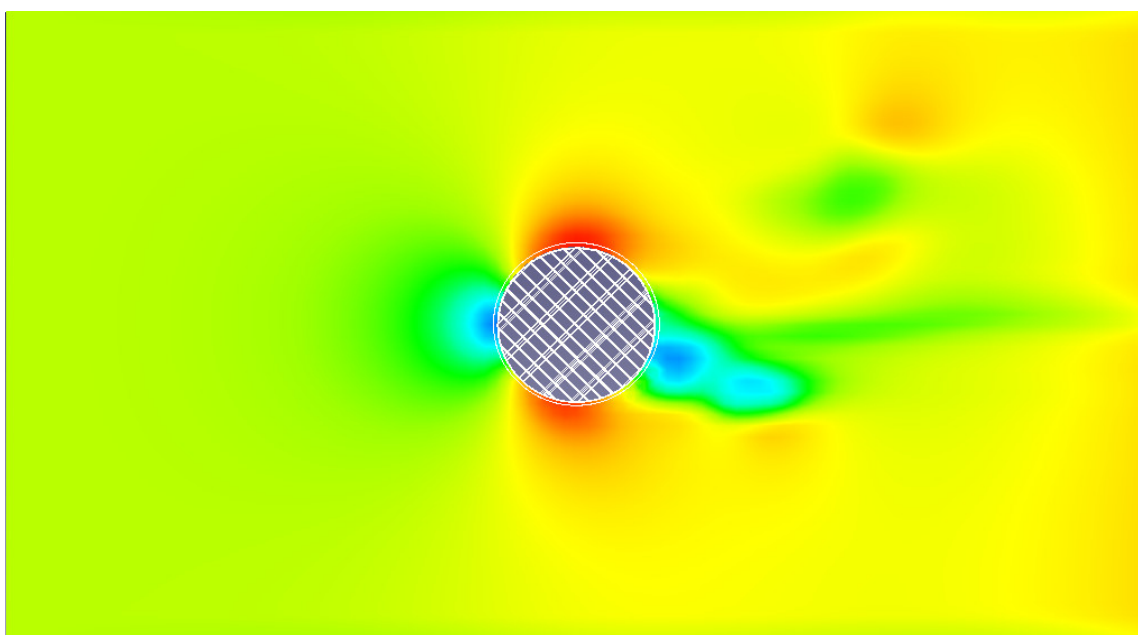


Рисунок 2.27 – Поле швидкості моделі №4 в площині XZ,  $V=25$  м/с

У першу чергу проаналізуємо якісні показники. Порівнявши між собою результати моделювання на рис. 2.18,а, рис. 2.26 та рис. 2.27, можна побачити, що загальний характер розподілу вимірюваної величини (швидкості вітру) у межах розрахункової області залишається практично однаковим. Відмінності в полях

швидкості пов'язані зі зменшенням кількості отриманих інтервалів значень при зменшенні швидкості вітрового потоку, отже, зі зменшенням кількості необхідних кольорів для їх відображення.

На рис. 2.28 наведено результати визначення максимального тиску повітряного потоку на модель ОК у межах розрахункової області імітаційної моделі та відповідно розраховані його критичні значення, які дають змогу зробити висновки про швидкість повітряного потоку, при якій будуть порушуватися граничні стани першої та другої груп.

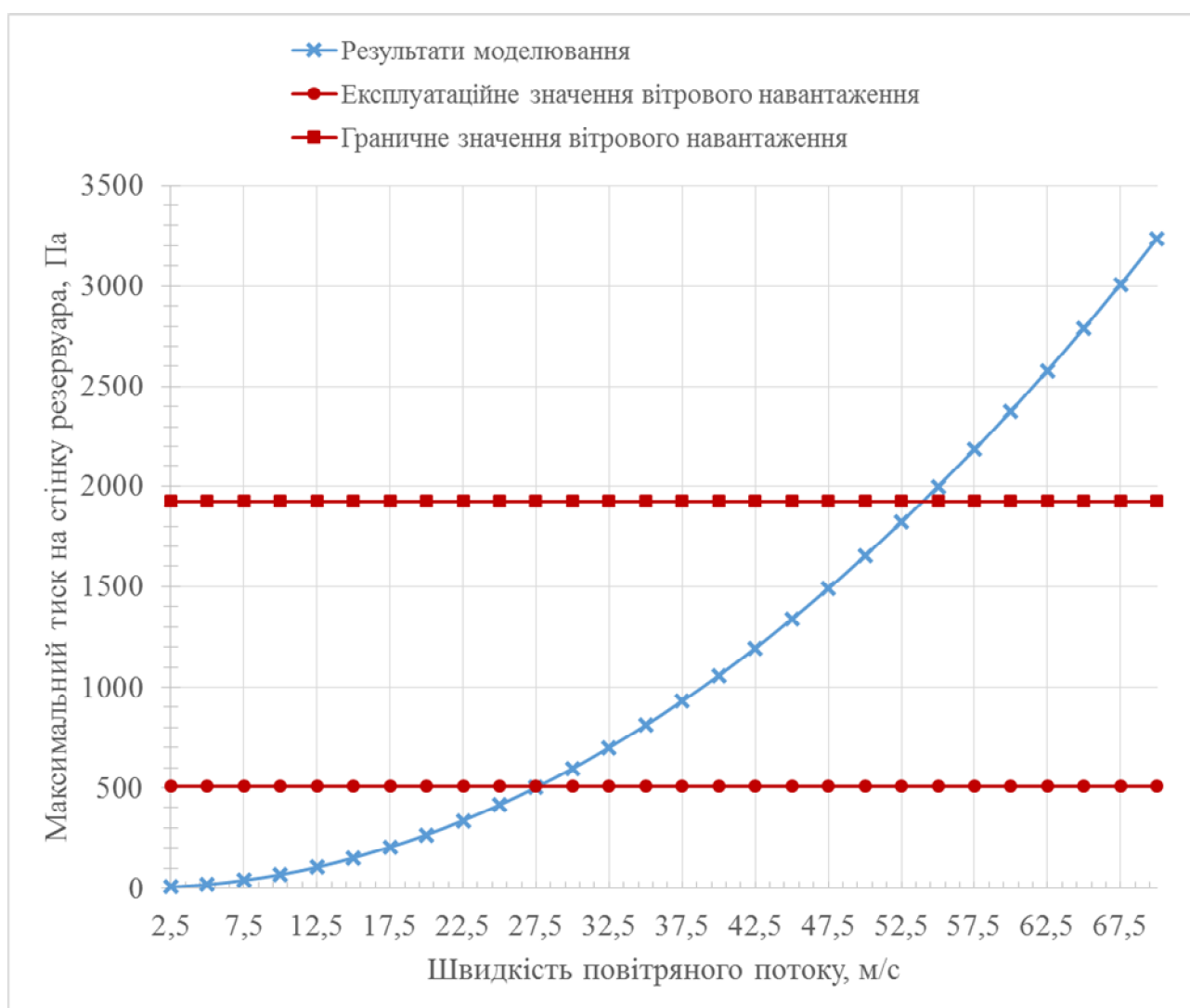


Рисунок 2.28 – Залежність тиску на ОК від швидкості повітряного потоку

Аналіз графіків показав, що при швидкостях вітрового потоку до 27,5 м/с тиск на РВС не буде перевищувати закладене у його проект експлуатаційне зна-

чення вітрового навантаження, а загрози втрати несучої здатності є при швидкості повітряного потоку більшій за 54 м/с. Отримані результати моделювання встановлюють наступну функціональну залежність впливу вітрового навантаження на резервуар

$$P = 0,6598V^2 + 0,0016V + 2,5421$$

де  $P$  – максимальний тиск на стінку резервуара, Па;  $V$  – швидкість повітряного потоку, м/с,

з достовірністю апроксимації, показником якої є коефіцієнт детермінації,  $R^2 = 0,98$ .

За наведеним на рис. 2.28 графіком визначимо такі експлуатаційні області:

1) Нормальної (безпечної) експлуатації, що відповідає швидкості повітряного потоку до 27,5 м/с та тиску до 508 Па.

2) Область появи небажаних напружень та пластичних деформацій, що відповідає швидкості повітряного потоку від 27,5 м/с до 54 м/с та тиску від 508 Па до 1924 Па. Накопичення залишкових (пластичних) деформацій може призводити до необхідності виведення ОК з експлуатації для проведення поточного ремонту.

3) Аварійна область, що характеризується високою ймовірністю втрати несучої здатності при перевищенні швидкістю повітряного потоку значення в 54 м/с, а тиском – 1924 Па.

Для забезпечення безпечної експлуатації резервуара у двох останніх випадках значень швидкості повітряного потоку необхідним є використання спеціальних засобів захисту.

Результати наведених у даному розділі досліджень опубліковані в роботах [97-104].

## Висновки до розділу 2

- 1) У якості ОК обрано резервуар, що знаходиться в критичних умовах експлуатації: при низьких температурах та дії значного вітрового навантаження.
- 2) Для розглянутого резервуара проведено аналітичний розрахунок величини граничного та експлуатаційного значень вітрового навантаження, що відповідно дорівнюють 1924 Па та 508 Па.
- 3) Розраховано загальний час порушення другого граничного стану при закладеній у проект ефективній експлуатації ОК протягом 40 років, який дорівнює 0,08 років або, для більшої наглядності, близько 3 хвилин за добу. Таким чином, при розробці системи функціональної діагностики критерієм для ввімкнення попереджувального сигналу (звукового або оптичного) буде перевищення допустимого рівня деформацій або вібрації протягом 3 хвилин за добу.
- 4) Використовуючи креслення ОК та його фотографії, було створено шість основних геометричних моделей для дослідження, впливу елементів конструкції на характер розподілу швидкості повітряного потоку та його тиску на ОК в межах розрахункової області імітаційної моделі, які відрізняються наявністю фундаменту, повітряних дихальних клапанів та формою даху.
- 5) Шляхом імітаційного моделювання визначено вплив елементів конструкції ОК на характер розподілу швидкості повітряного потоку та його тиску на ОК в межах розрахункової області. За отриманими результатами для подальшого дослідження обрано модель №4, що має фундамент спеціальної форми і плоский дах, та в якій відсутні додаткові елементи на даху (повітряні дихальні клапани).
- 6) Розраховано абсолютні та відносні похибки визначення тиску повітряного потоку на стінку резервуара шляхом імітаційного моделювання в порівнянні з його аналітичним розрахунком. Абсолютна та відносна похибки відповідно дорівнюють 20,7 Па та 1,71 %. Показано, що є необхідність при імітаційних моделюваннях враховувати вектор гравітації, який уточнює результат аналітичного розрахунку на 10,63 %.

7) Проведено дослідження впливу повітряного потоку різної швидкості на обрану геометричну модель №4, у результаті якого встановлено функціональну залежність впливу вітрового навантаження на резервуар. Це дозволило визначити три експлуатаційні області: при швидкостях повітряного потоку до 27,5 м/с тиск на резервуар не буде перевищувати запроектоване експлуатаційне значення вітрового навантаження, для втрати несучої здатності резервуара швидкість повітряного потоку має перевищувати 54 м/с, проміжок швидкостей повітряного потоку від 27,5 м/с до 54 м/с характеризується появою небажаних напружень та пластичних деформацій, які можуть призводити до необхідності виведення ОК з експлуатації для проведення поточного ремонту.

Для безпечної експлуатації РВС в умовах динамічних збурень, викликаних вітровим навантаженням, необхідно розробити спеціальні заходи для захисту ОК.

## РОЗДІЛ 3

### РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСОБІВ ЗАХИСТУ РЕЗЕРВУАРІВ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ ЕКОЛОГІЧНО-НЕБЕЗПЕЧНИХ РЕЧОВИН ВІД ВІТРОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Як показали дослідження впливу вітрового навантаження у розділі 2 та світова практика експлуатації резервуарів, переважна більшість аварійних ситуацій виникає через крихке руйнування елементів їх конструкції внаслідок комплексної дії низьких температур та вітрового навантаження. Як згадувалося раніше, вітер – динамічне навантаження, так як швидкість повітряного потоку весь час змінюється. Реакція резервуарів на вітер буде різною: жорсткі конструкції сприймають її як статичну, а реакція гнучких конструкцій залежить від частоти вільних (власних) коливань [68].

Тому для забезпечення безаварійної експлуатації резервуарів в умовах підвищеного рівня вітрового навантаження необхідно розробити засоби пасивного захисту, що дозволять знизити ризик виникнення аварійних ситуацій шляхом зменшення зон концентрації напружень та низьких температур, викликаних повітряним потоком великої швидкості.

У даному розділі на основі імітаційного моделювання проведено розробку засобів захисту резервуарів з ЕНР від вітрового навантаження. Проаналізовані засоби активного та пасивного захисту, обґрунтовано конструкцію та досліджено ефективність засобу пасивного захисту об'єктів від вітрового навантаження для двох випадків: резервуарів з підземним та наземним фундаментами.

#### 3.1 Загальна характеристика засобів захисту об'єктів від вітрового навантаження

Вітрове навантаження на інженерні та будівельні споруди стало предметом вивчення на початку минулого століття. Зростання розмірів і ускладнення форми конструкцій, для багатьох з яких вітрове навантаження стало домінуючим, ви-



кликало потребу натурних спостережень за спорудами. Вітрове навантаження досліджувалося по включеним в конструкцію індикаторам статичних та динамічних зусиль. При цьому записувалися швидкість і напрям вітру по висоті, величина і напрями переміщення конструкції. Такі спостереження проводилися іноді декілька років, наприклад, за трубами теплових електростанцій, висячими мостами, тощо.

За час вивчення характеру розподілу вітрового навантаження було отримано багато цінних матеріалів, але їх було недостатньо по ряду міркувань [68]. У багатьох спостереженнях не проводився синхронний запис швидкості повітряного потоку і деформацій конструкції. Часто обмежувалися даними середньої швидкості вітру на висоті 10 м. Більшість спостережень було зроблено в умовах відносно слабких вітрів, коли багато явищ згладжуються, що призводить до спотворення кількісної оцінки. Можна вказати і на ряд інших обставин, що перешкоджають встановленню точних взаємозв'язків між силою вітру і переміщенням конструкції. Наприклад, для правильної оцінки профілю вітру по висоті необхідні прилади повинні бути розміщені на значній відстані від конструкції, щоб виключити спотворення повітряного потоку, що вносяться спорудою.

Завдяки появі пов'язаних з надмірним вітровим навантаженням проблем з'явилася необхідність розробки ефективних засобів захисту від нього. Загалом засоби захисту від вітрового навантаження можна розділити на два типи, а саме: активні (рухомі системи) та пасивні (нерухомі системи). Ефективність використання того чи іншого типу захисту залежить у першу чергу від форми та розмірів об'єкта контролю, етапу його життєвого циклу (проектування чи експлуатація), місця розташування та конкретних цілей, на які спрямований кожен тип захисних конструкцій.

Як уже зазначалось раніше, реакція конструкцій низької жорсткості значною мірою залежить від динамічного характеру вітрового навантаження. Пориви вітру (циклічні навантаження) викликають коливання конструкції, які створюють додаткові напруження в її елементах, що в результаті призводить до виникнення та розвитку втомних тріщин. Нині для боротьби з небажаними коливаннями іс-

нує багато методів і засобів, кожен з яких має свої особливості застосування. Важливе місце серед засобів зниження рівня вібрації (у тому числі від вітрового навантаження) займають гасники коливань [105] завдяки високій ефективності при відносно малих витратах і можливості їх застосування як на стадії проектування, так і в процесі експлуатації.

У загальному випадку гасники коливань являють собою додаткові динамічні пристрої, приєднані до об'єкта контролю (захисту) з метою зміни його вібраційного стану. Під цим загальним формулюванням може бути представлено безліч фізичних і конструктивних схем – динамічні, ударні, маятникові, плаваючі гасники коливань, тощо. Необхідною умовою для ефективної роботи будь-якого виду гасника є оптимізація його характеристик, тобто вибір власної частоти і демпфірування при заданій масі гасника. У деяких випадках також виникає необхідність оптимізації його маси і розташування.

Жорсткі конструкції сприймають вітер як статичне навантаження, що не призводить до значної зміни рівня вібрації, тому для таких об'єктів доцільніше використовувати засоби пасивного захисту – нерухомі об'єкти (системи), які встановлюються поблизу/на/навколо об'єкта контролю (захисту), сприймають основне вітрове навантаження та змінюють напрям повітряного потоку, зменшуючи тим самим напружено-деформований стан об'єкта контролю (захисту).

Одним з найрозповсюдженіших засобів пасивного захисту є обтічник – спеціальна конструкція, що полегшує обтікання об'єкта потоком газу або рідини [106]. Обтічники знайшли широке застосування в технічних пристроях, що рухаються з великою швидкістю, таких як автомобілі, літаки та ракети, так як їх введення збільшує можливу швидкість і знижує витрату палива. Приклади використання обтічників як засобів пасивного захисту від вітрового навантаження зображено на рис. 3.1.

Отже, засоби як активного, так і пасивного захисту об'єктів від вітрового навантаження широко розповсюджені у різних сферах науки та техніки. Не завжди доцільно повністю закривати об'єкт обтічником, як це зображено на рис. 3.1, а, особливо, коли об'єкт захисту має великі габарити, як більшість резервуарів з

ЕНР. Для таких об'єктів необхідно розробити засіб пасивного захисту з малими габаритними розмірами у порівнянні з ОК та максимально можливим ефективним зниженням вітрового навантаження.



а)



б)

а) радіопрозорий обтічник антенного комплексу;      б) обтічник мотоцикла.

Рисунок 3.1 – Пасивний захист об'єктів від вітрового навантаження

Це дозволить забезпечити допустимі для безпечного функціонування резервуарів значення швидкості повітряного потоку та зменшити ймовірність появи небажаних напружень і деформацій, які можуть призвести до появи та розвитку пошкоджень.

### **3.2 Розробка засобу пасивного захисту резервуарів від вітрового навантаження**

Завдяки особливостям конструкції (двостінний, присутні ребра жорсткості, тощо) та експлуатації (зберігання до 150 м<sup>3</sup> дизельного палива, розташування ОК далеко від кваліфікованого для проведення ремонтних робіт персоналу та ресурсної бази, а також в складних кліматичних умовах) об'єкт контролю можна вважати жорсткою конструкцією [107], яка знаходиться під впливом складних ди-

намічних збурень у важкодоступному місці установки. Тому для такого типу резервуарів постає завдання розробки засобу пасивного захисту конструкції від вітрового навантаження.

У [68] розглянуто тандем циліндрів, як один з варіантів захисту від повітряного потоку. Недоліком такого варіанту є використання обтічника однакового з резервуаром діаметра, що практично неможливо фізично реалізувати у важкодоступних місцях установки резервуарів. Обґрунтування, розробку та аналіз ефективності захисних засобів для таких резервуарів з ЕНР доцільно виконувати на основі імітаційного моделювання. Першим кроком для вирішення даної задачі є побудова моделей обтічника різних форм і розмірів, а також моделей системи об'єкт-обтічник для подальшого дослідження.

Існує велика кількість різноманітних геометричних фігур, які можна використати як основу для побудови обтічника, тому для пошуку найбільш ефективних форм було прийнято рішення проводити імітаційне моделювання з використанням невеликих груп можливих конструктивних рішень засобу пасивного захисту. У разі низької ефективності всіх форм першої групи здійснюється перехід до другої групи геометричних фігур і так далі. Даний підхід дозволить виявити ефективну форму засобу пасивного захисту з точки зору максимального зниження повітряного тиску на стінку ОК, яке приймемо рівним 40 % (зниження тиску з 1339 Па до 800 Па), що забезпечить розширення зони безпечної експлуатації об'єкта захисту згідно з результатами, наведеними на рис. 2. 28.

Для досліджень обираємо обтічники з наступними геометричними фігурами в їх поперечному перерізі:

- коло;
- квадрат;
- зірка або її подоба, отримана, наприклад, шляхом поділу труби у вертикальній площині на чотири рівні частини і подальше їх з'єднання між собою як показано на рис. 3.2.

Вибір перших двох форм пов'язаний з відносною простотою реалізації обтічника круглого і квадратного перетину при використанні різних матеріалів у

тому числі в складних кліматичних умовах (наприклад, у регіоні Антарктики). Для обтічника зіркоподібної форми існують деякі складнощі його виробництва і монтажу, пов'язані з необхідністю виконання додаткових видів робіт при створенні такого обтічника із сталі, а саме:

- різання і зварювання труби для обтічників малого діаметра ( $d=2 \cdot A < 500$  мм);
- вигин й зварювання листової сталі для обтічників великого діаметру ( $d > 500$  мм);
- в окремих випадках різання і зварювання труби для обтічників великого діаметра ( $d > 500$  мм).

На рис. 3.2 параметром «А» позначено радіус для круглого та зіркоподібного обтічників і довжина ребра для обтічника квадратного перетину. Для дослідження впливу ширини/радіусу обтічника на його ефективність використані наступні значення параметра  $A=500$  мм; 750 мм; 1000 мм. Значення  $A > 1000$  мм у даній роботі не розглядаються через значне підвищення вартості виробництва такого обтічника за рахунок збільшення його об'єму. Дослідження обтічників при  $A > 1000$  мм може бути необхідним для підвищення ефективності їх застосування для вертикальних циліндричних резервуарів з діаметром понад 8 м або для резервуарів нециліндричної форми.

Крім ширини/радіусу необхідним є також дослідження впливу ще двох параметрів, а саме: висоти обтічника  $h$  і міжосьової відстані  $L$ . Висота була обрана рівною  $1/3$ ;  $2/3$ ;  $3/3$ ;  $4/3$ ;  $5/3$  висоти самого резервуара. Під міжосьовою відстанню  $L$  мається на увазі відстань між вертикальними осями резервуара і обтічника круглої форми. Для обтічників квадратної і зіркоподібної форми вертикальна вісь утворюється шляхом з'єднання точок, отриманих при перетині діагоналей, на нижній і верхній основах. Мінімальна можлива відстань може бути обумовлена наявністю виступаючих частин фундаменту, які не дадуть можливості надійного монтажу обтічника в реальних умовах експлуатації. Для дослідження обрані значення міжосьової відстані від 5 м до 9 м з кроком 1 м.

Побудова складальних одиниць (рис. 3.3) здійснювалася за допомогою CAD-системи CATIA. Усього було побудовано сімдесят п'ять геометричних моделей для кожної форми обтічника, які склалися з різної комбінації параметрів – висоти обтічника, його радіусу/ширини, а також міжосьової відстані.

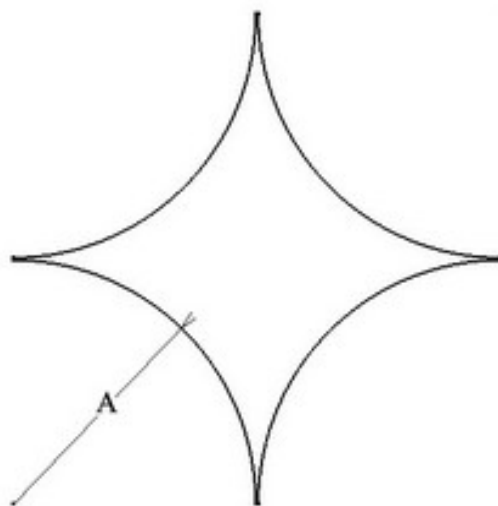


Рисунок 3.2 – Загальний вигляд поперечного перерізу обтічника зіркоподібної форми

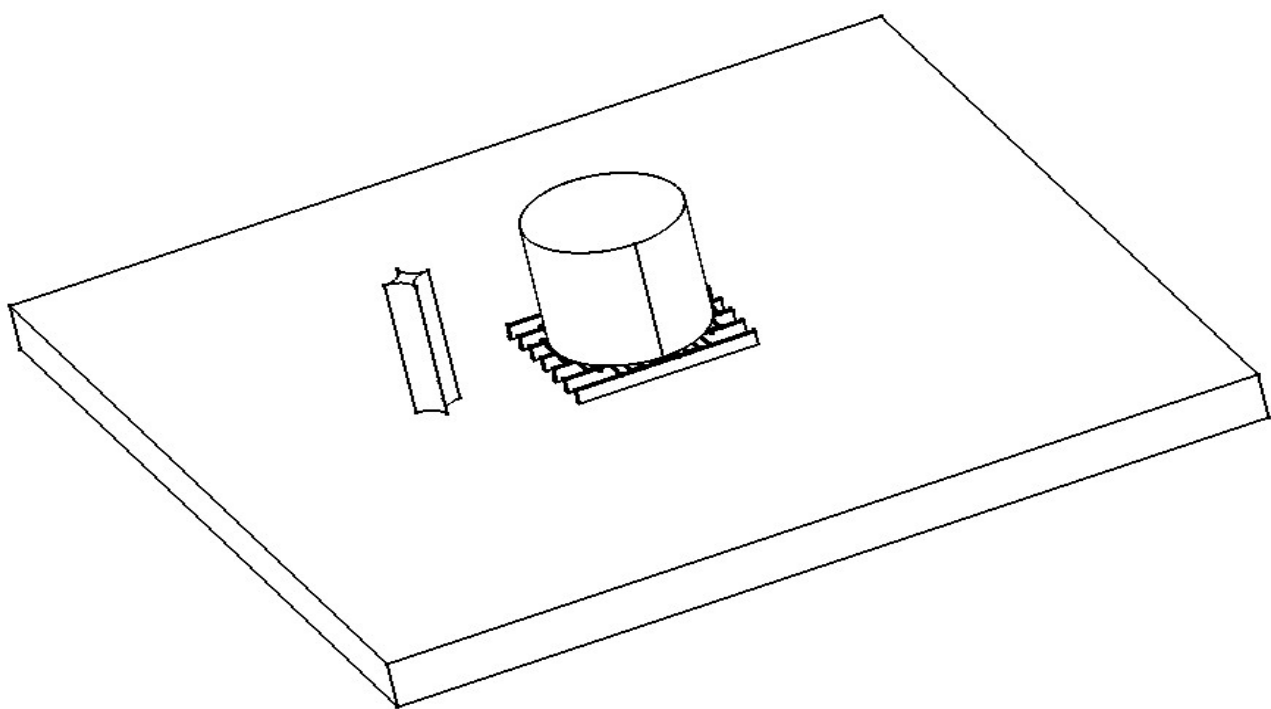


Рисунок 3.3 – Загальний вигляд складальної одиниці з обтічником

### 3.2.1 Дослідження ефективності обтічника для резервуара з наземним фундаментом

Процес проектування та дослідження обтічників може розвиватися за двома напрямками [108]:

1) Задача поставлена вірно:

- задача вирішується при будь-яких вхідних даних;
- є тільки один розв'язок;
- рішення неперервно залежить від вхідних даних (малому приросту вхідних даних відповідає малий приріст розв'язку), тобто задача стійка;
- розв'язок збігається.

2) Задача некоректна:

- рішення нестійке відносно вхідних даних (малому приросту вхідних даних може відповідати великий приріст розв'язку);
- розв'язок не збігається.

За допомогою програмного комплексу ANSYS в два етапи (с грубою та більш щільною сіткою) проведено імітаційне моделювання впливу вітрового навантаження на резервуар при наявності обтічника різних форм і розмірів. Швидкість повітряного потоку була обрана рівною 45 м/с [31]. Усього на першому етапі було проведено більше двохсот двадцяти п'яти моделювань з використанням грубої сітки (близько 1 мільйона тетраедрів) для виявлення найбільш оптимальних комбінацій досліджуваних параметрів за умови досягнення заданої ефективності. Результати систематизовано і зведено в таблицю, на основі якої побудовано графіки залежності максимального тиску на поверхні резервуара при наявності з боку дії вітрового потоку обтічника від його висоти.

На рис. 3.4 наведено графіки залежності тиску на резервуар при наявності обтічників, легенда вказана у форматі «форма поперечного перерізу *радіус/ширина*; міжосьова відстань». Відносна висота обтічника визначається як частка від висоти об'єкта захисту. Аналіз результатів показав, що найбільше зменшення максимального тиску (з 1339 Па до 605 Па) досягається при використанні

обтічника зіркоподібної форми з радіусом 1000 мм, висотою, що дорівнює висоті резервуара і міжосьовою відстанню 9 м. Другим по ефективності (максимальний тиск на стінках резервуара дорівнює 781 Па) виявився обтічник зіркоподібної форми з радіусом 1000 мм, такою ж висотою і відстанню до резервуара 8 м.

Обтічник квадратної форми з довжиною ребра 1000 мм, висотою, що дорівнює висоті резервуара і міжосьовою відстанню 9 м показав себе менш ефективним (852 Па). Також з рис. 3.4 видно, що обтічник квадратної форми з довжиною ребра 500 мм, висотою 2/3 від висоти резервуара (4950 мм) і відстанню до нього 9 м дає дещо гірший результат (878 Па) у порівнянні з попереднім випадком, але є економічно більш вигідним за рахунок менших розмірів. Обтічники круглого перетину в даному дослідженні показали порівняно низьку ефективність (до 25 % зниження тиску повітряного потоку на стінку резервуара), тому надалі розглядатися не будуть.

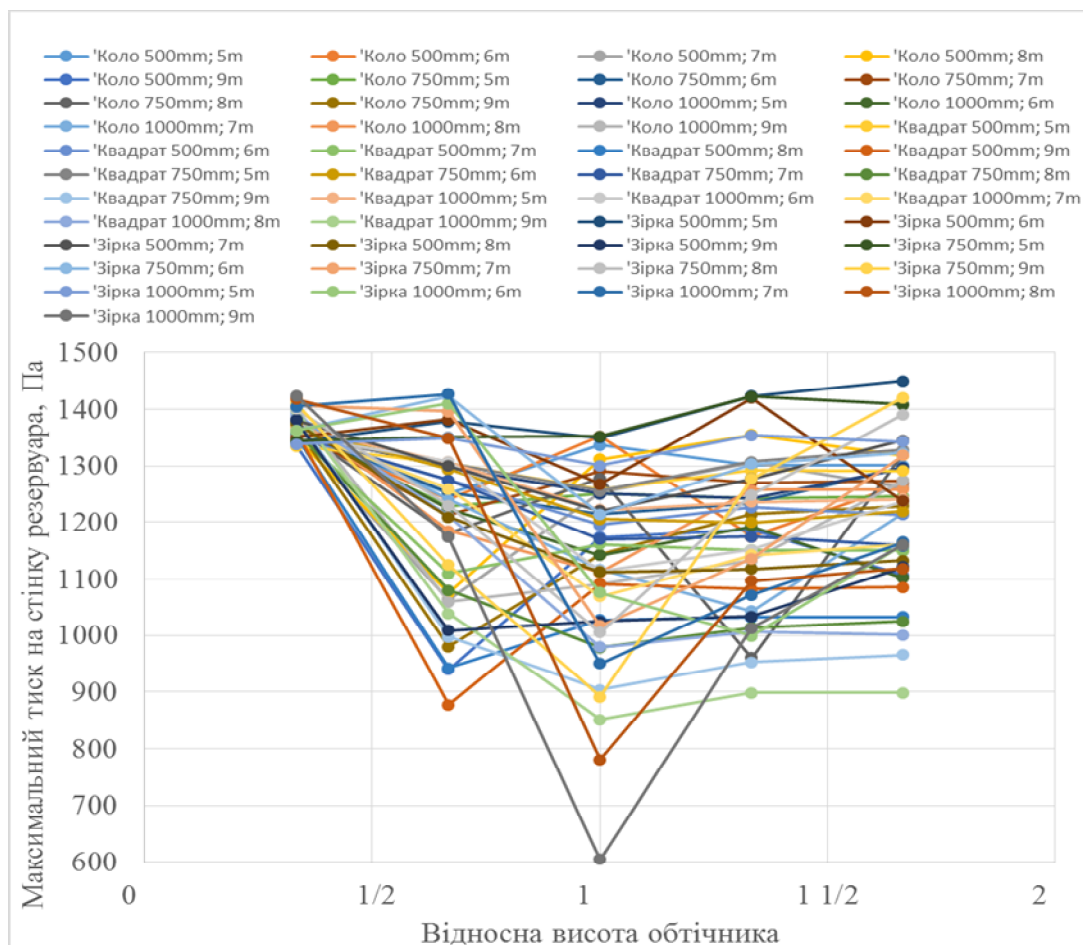


Рисунок 3.4 – Графік залежності максимального тиску на стінках ОК від висоти обтічника



Для другого етапу імітаційного моделювання з більш якісною сіткою (більше 2 мільйонів тетраедрів) було обрано такі обтічники: зіркоподібний з радіусом 1000 мм і міжосьовою відстанню 9 м; квадратного перетину з довжиною ребра 1000 мм і міжосьовою відстанню 9 м. У обох випадках висота обтічника дорівнює висоті резервуара. Моделювання виконано для швидкостей повітряного потоку від 2,5 м/с до 70 м/с з кроком в 2,5 м/с. Ущільнення скінчено-елементної сітки збільшує кількість необхідного на розрахунок часу, а також точність отриманих результатів, тому були досліджені тільки два обтічника з чотирьох визначених на попередньому етапі.

Функціональні залежності (кількісні характеристики) максимального тиску від швидкості вітрового потоку наведені на рис. 3.5.

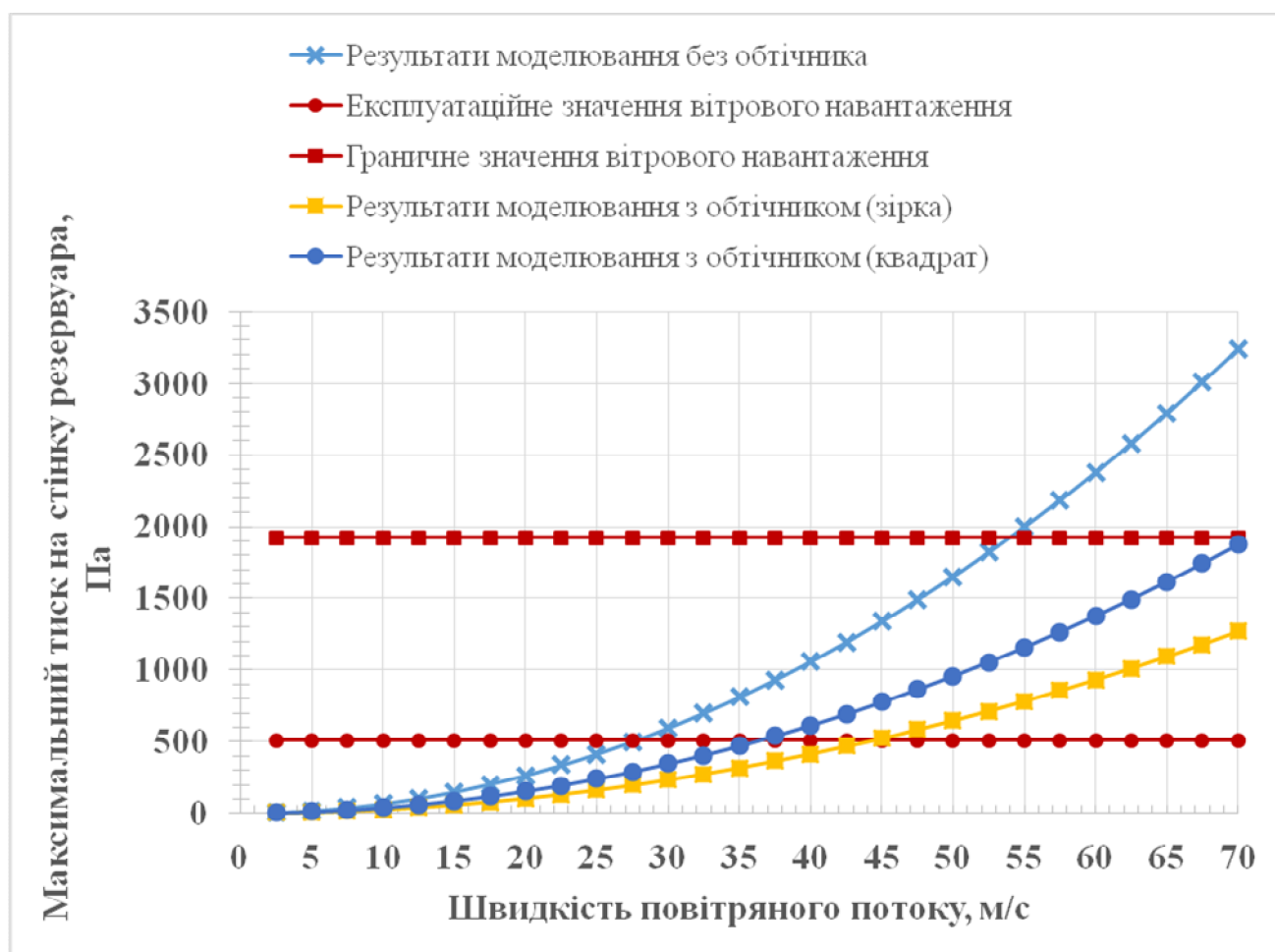


Рисунок 3.5 – Графік залежності максимального тиску на стінку резервуара від швидкості вітру

Для порівняння на рис. 3.5 наведено графік залежності максимального тиску від швидкості повітряного потоку без обтічника. Як видно, при використанні обтічника з квадратним перетином зона безпечної експлуатації збільшується до значення швидкості вітру в 35 м/с. Використання зіркоподібного обтічника дозволить ще більше збільшити зону безпечної експлуатації до значення швидкості вітру в 44 м/с, що практично відповідає максимальній швидкості вітру (45 м/с, [31]) в складних умовах експлуатації резервуара. Також важливим результатом є те, що застосування обраних для дослідження обтічників дозволить уникнути втрати резервуаром несучої здатності навіть при критичних швидкостях вітру понад 55 м/с, так як максимальний тиск на поверхні ОК не перевищуватиме граничного розрахункового значення.

За результатами розрахунку на рис. 3.6 наведено графіки, що відображають ефективність (показник зменшення максимального тиску на резервуар) досліджених обтічників. Як видно з наведених результатів, наявність обтічника зіркоподібної форми дозволяє знизити величину вітрового навантаження на резервуар в середньому на 60 %, а обтічника квадратного перетину – на 40 %. При цьому для малих швидкостей вітру (до 10 м/с) ефективність обтічників є високою і складає від 40 % до 60 % для обтічника зіркоподібної форми та від 30 % до 40 % – для обтічника квадратного перетину.

Отже, враховуючи кількісні показники можна зробити висновок, що обтічники з першої розглянутої групи (за винятком круглого перетину) мають достатню ефективність при прийнятих розмірах, тому інші геометричні форми розглядати не доцільно.

Для аналізу якісних характеристик (полів швидкості та тиску повітряного потоку) в першу чергу необхідно визначити початковий стан резервуара. З рис. 3.7 (на всіх рисунках вектор повітряного потоку спрямований уздовж осі Y) видно, що при відсутності будь-яких засобів захисту розподіл навантаження по резервуару практично не змінюється при збільшенні швидкості вітру від 20 м/с до 45 м/с, збільшується тільки значення тиску. Таким чином, можна зробити висновок, що при наявності в цій області додаткового концентратора напружень (пат-

рубків, зварних швів, тощо) підвищується ймовірність появи та розвитку дефектів.

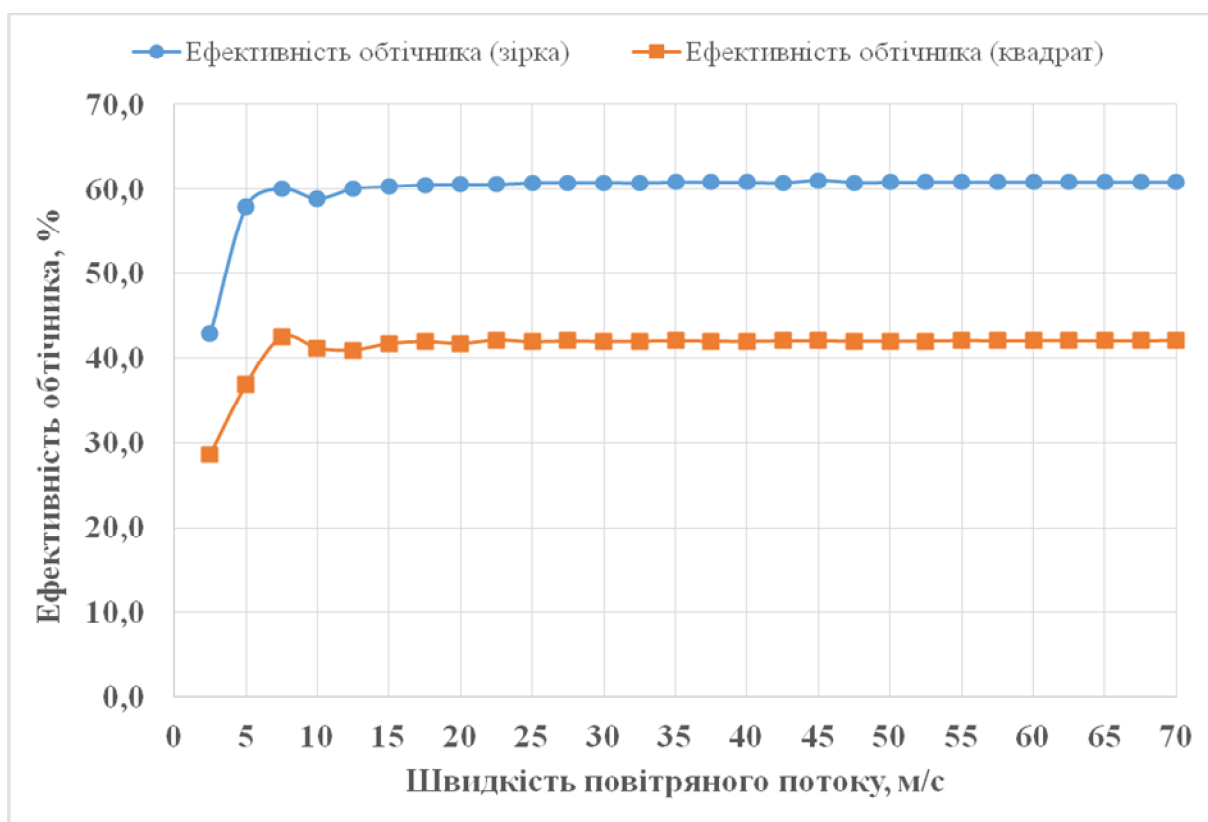


Рисунок 3.6 – Графік залежності ефективного зниження тиску від швидкості вітру

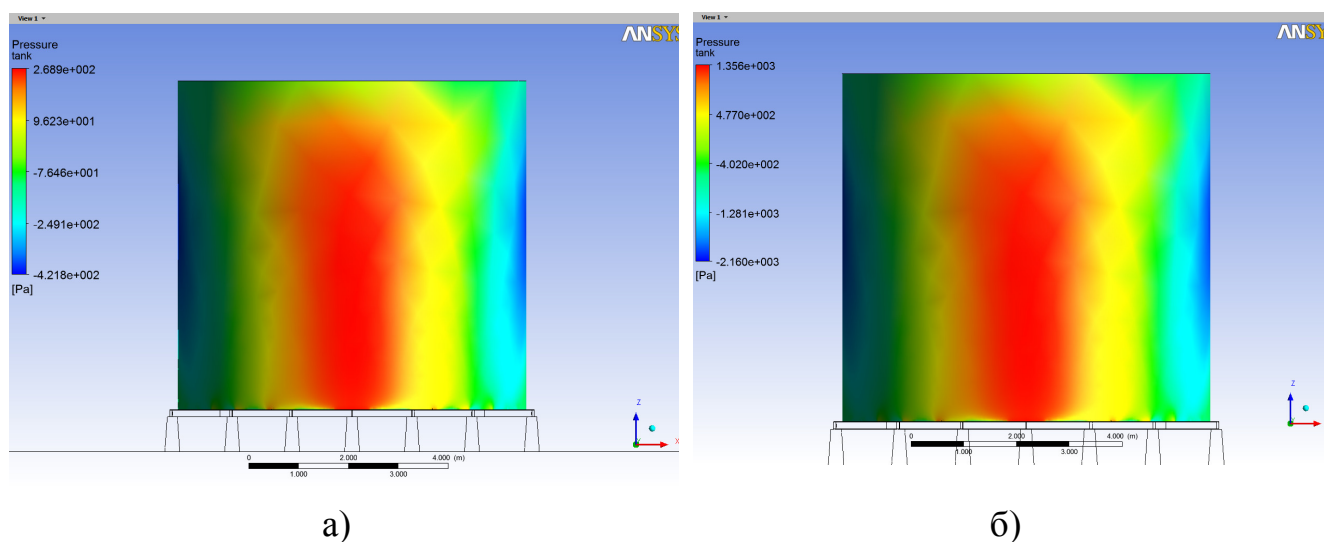


Рис. 3.7 – Розподіл тиску повітряного потоку по резервуару без засобів захисту

При використанні обтічника зіркоподібної форми розподіл тиску від повітряного потоку значно змінюється. Як показано на рис. 3.8, обтічник приймає на себе більшу частину вітрового тиску. При цьому на резервуарі присутні дві зони, які сприймають залишкову величину (в середньому на 60 % менше, ніж без обтічника) тиску повітряного потоку, тому що в цих місцях вектори швидкості спрямовані не по дотичній до резервуару (рис. 3.9). Цього можна уникнути, якщо збільшити діаметр обтічника, але виходячи з отриманих раніше даних, навіть при максимальній швидкості вітру, ОК буде знаходитися в межах зони безпечної експлуатації.

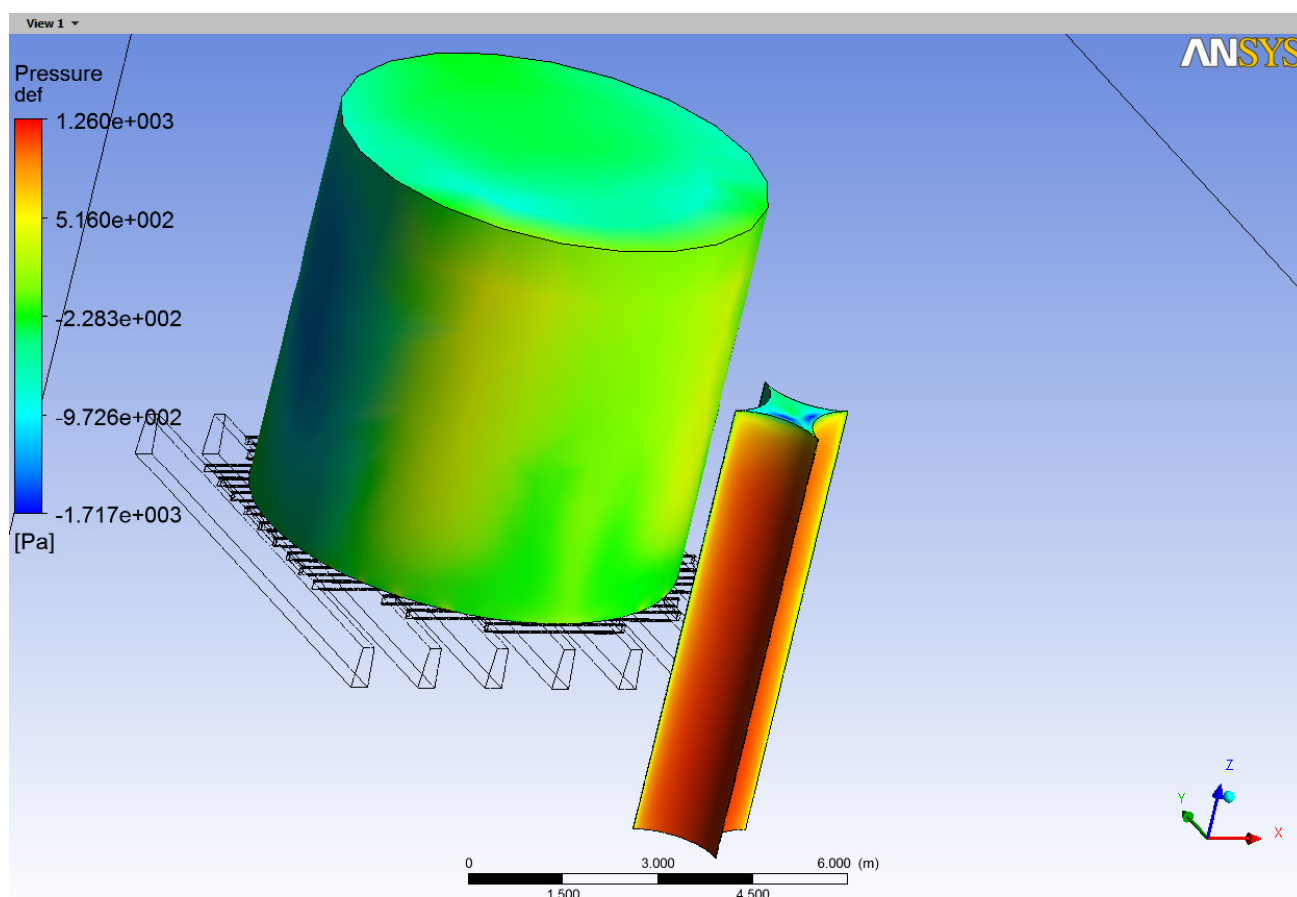


Рисунок 3.8 – Розподіл тиску повітряного потоку по резервуару і обтічнику при швидкості вітру 45 м/с

Також встановлено (рис. 3.4), що ефективність обтічників починає проявлятися при їх висоті, що складає  $\frac{2}{3}$  висоти резервуара, але приймає необхідні значення у випадках, коли обтічник однієї висоти з ОК.



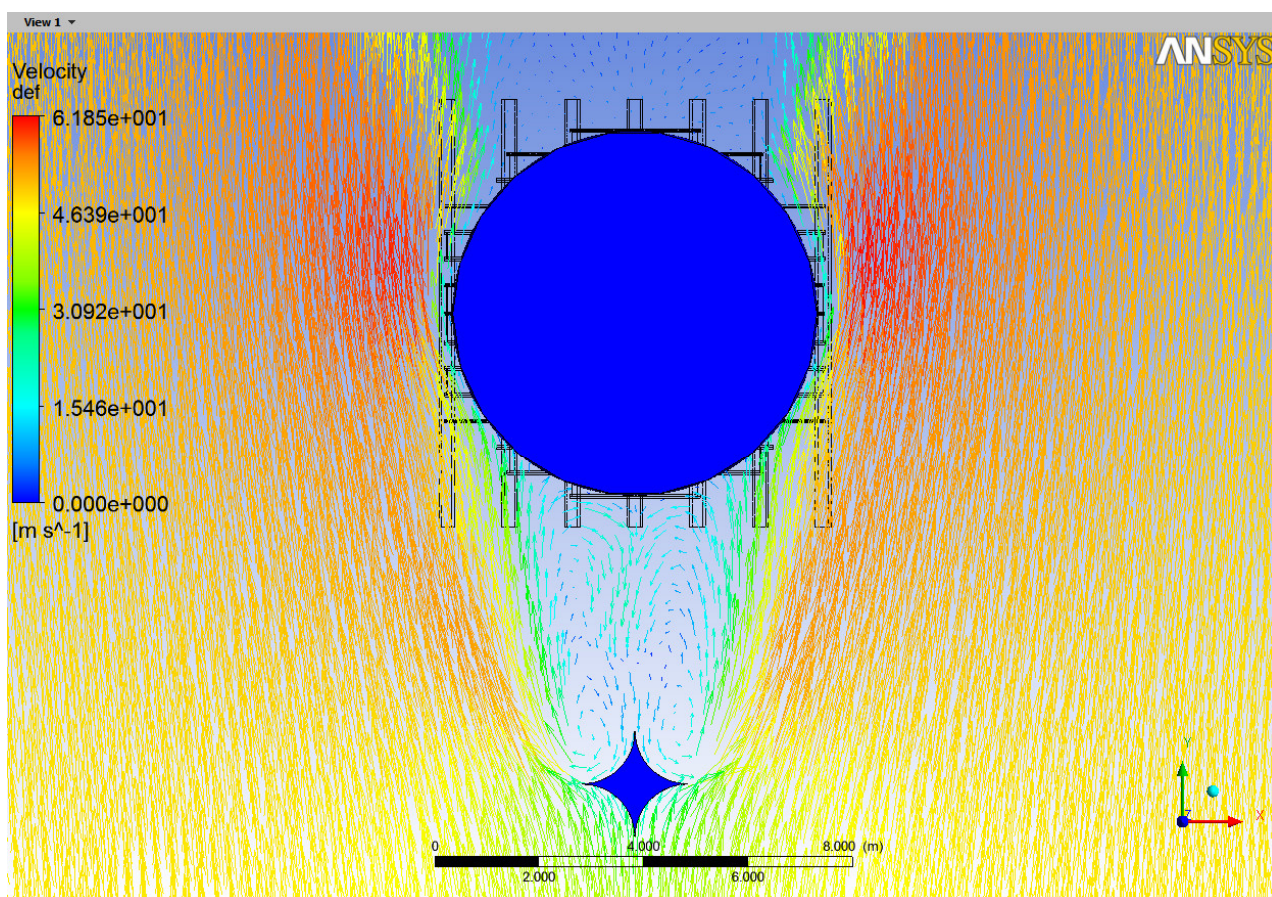


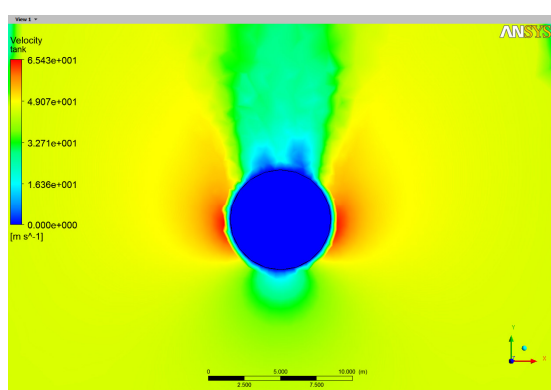
Рисунок 3.9 – Вектори швидкості повітряного потоку

На рис. 3.10-рис. 3.12 показані поля швидкостей і тиску повітряного потоку в горизонтальній площині, що перетинає резервуар. Без обтічника (рис. 3.10) ОК повністю сприймає вітрове навантаження. Розподіл тиску по резервуару не змінюється зі збільшенням швидкості повітряного потоку. Це пов'язано з тим, що геометричні характеристики резервуара залишаються незмінними, а значить незмінна і обтічність його форми.

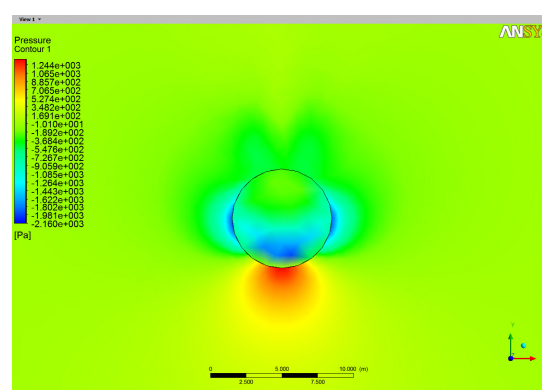
У разі наявності засобу пасивного захисту розподіл потоків повітря і вітрового тиску відбувається інакше. Завдяки своїй викривленій по радіусу формі зіркоподібний обтічник розсікає потік повітря і одночасно відхиляє його, створюючи при цьому широкий повітряний коридор. Швидкість вітру в цьому коридорі в 1,5 рази менше початкової. При цьому між обтічником і резервуаром можливе утворення циркулюючих потоків повітря, які створюють незначні динамічні збурення у вигляді вібрації (рис. 3.9). Проте ці потоки повторно розсікаються (втра-

чаючи при цьому швидкість) за рахунок симетричної конструкції обтічника і відхиляються в загальний потік, або спускаються під фундамент резервуара.

Обтічник квадратної форми також створює повітряний коридор, але вже за рахунок того, що потоки повітря огинають його по дотичній і зберігають велику частину своєї швидкості. Саме тому зона безпосереднього впливу потоків повітря і їх тиск на резервуар більше. Слід зазначити, що величина негативного тиску, яку сприймає ОК в перпендикулярній вектору вихідної швидкості вітру площині, теж знижується в 1,5-2 рази при використанні обтічників.



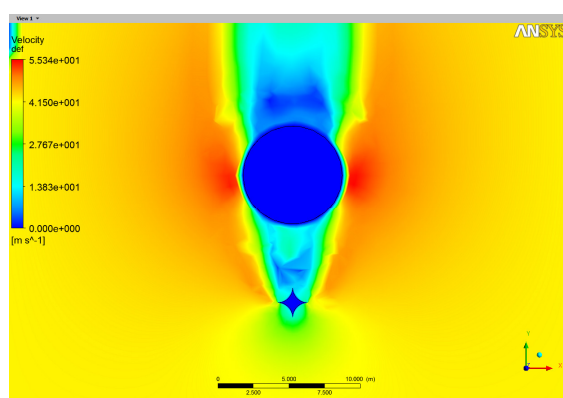
а)



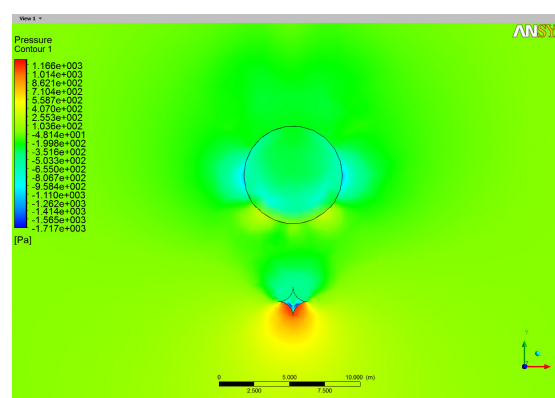
б)

а) швидкості повітряного потоку; б) тиску повітряного потоку.

Рисунок 3.10 – Поля в горизонтальній площині без обтічника



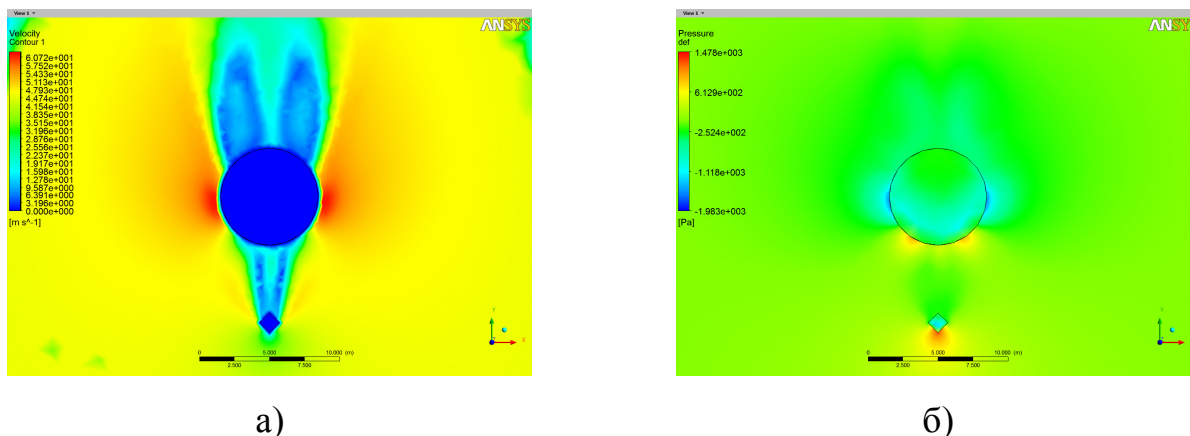
а)



б)

а) швидкості повітряного потоку; б) тиску повітряного потоку.

Рисунок 3.11 – Поля в горизонтальній площині з зіркоподібним обтічником



а) швидкості повітряного потоку; б) тиску повітряного потоку.

Рисунок 3.12 – Поля в горизонтальній площині з квадратним обтічником

### 3.2.2 Дослідження ефективності обтічника для резервуару з підземним фундаментом

Велика кількість резервуарів для зберігання екологічно-небезпечних речовин зводиться на підземному фундаменті (рис. 3.13). Така схема побудови відповідає розробленим у розділі 2 геометричним моделям №1 та №2, для яких необхідно також підтвердити ефективність розробленого засобу пасивного захисту. Оскільки значення тиску повітряного потоку в моделі №2 має незначне відхилення від аналогічного значення тиску моделі №1, можна припустити, що ці моделі подібні і розглядати тільки одну із них. Тому для дослідження ефективності обтічника для резервуарів з підземним фундаментом обрано геометричну модель з плоским дахом.

У ході імітаційного моделювання отримано такі функціональні залежності:

1) Залежність максимального тиску на стінках резервуару від висоти обтічника (рис. 3.14). За основу приймаються геометричні параметри, визначені у попередніх дослідженнях, а саме: зіркоподібна форма, радіус 1000 мм, між-осьова відстань 9 м. З рис. 3.14 видно, що на відміну від раніше розглянутого об'єкта для резервуарів з підземним фундаментом ефективність обтічника починає проявлятися при його висоті, яка дорівнює висоті самого резервуару, а мак-



симуму досягає при  $4/3$  висоти резервуара. Останню висоту засобу пасивного захисту від вітрового навантаження обрано для подальших досліджень.



а)



б)

а) резервуар для зберігання спирту; б) паливні резервуари.

Рисунок 3.13 – Приклади резервуарів з підземним фундаментом

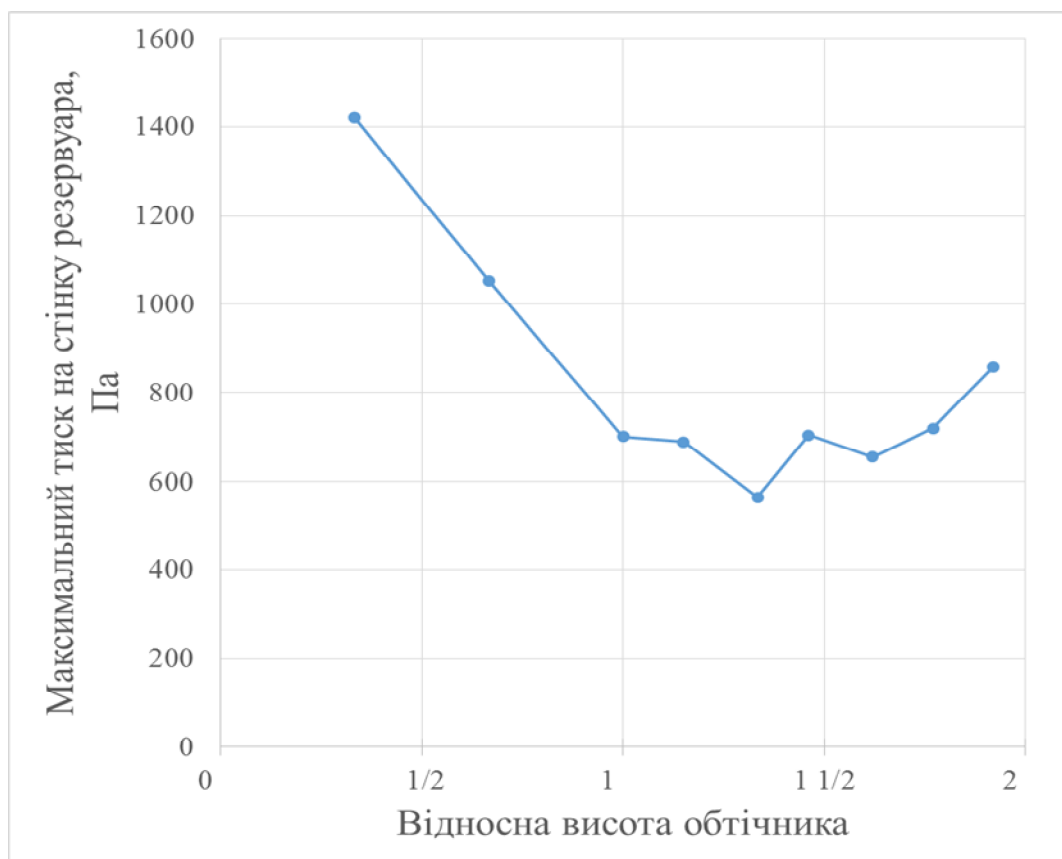


Рисунок 3.14 – Залежність максимального тиску на стінках резервуара від відносної висоти обтічника



2) Залежність максимального тиску на стінках резервуара від міжосьової відстані (рис. 3.15). За основу прийнято наступні геометричні параметри: зіркоподібна форма, радіус 1000 мм, висота рівна  $\frac{4}{3}$  висоти резервуара. З рис. 3.15 видно, що максимальна ефективність обтічника досягається при міжосьовій відстані в 9 м, що відповідає результатам, отриманим для раніше розглянутого резервуара з наземним фундаментом. На рис. 3.15 також наведено графік, отриманий при однакових висотах обтічника та резервуара. У цьому випадку ефективність зниження вітрового навантаження більша при меншій міжосьовій відстані.

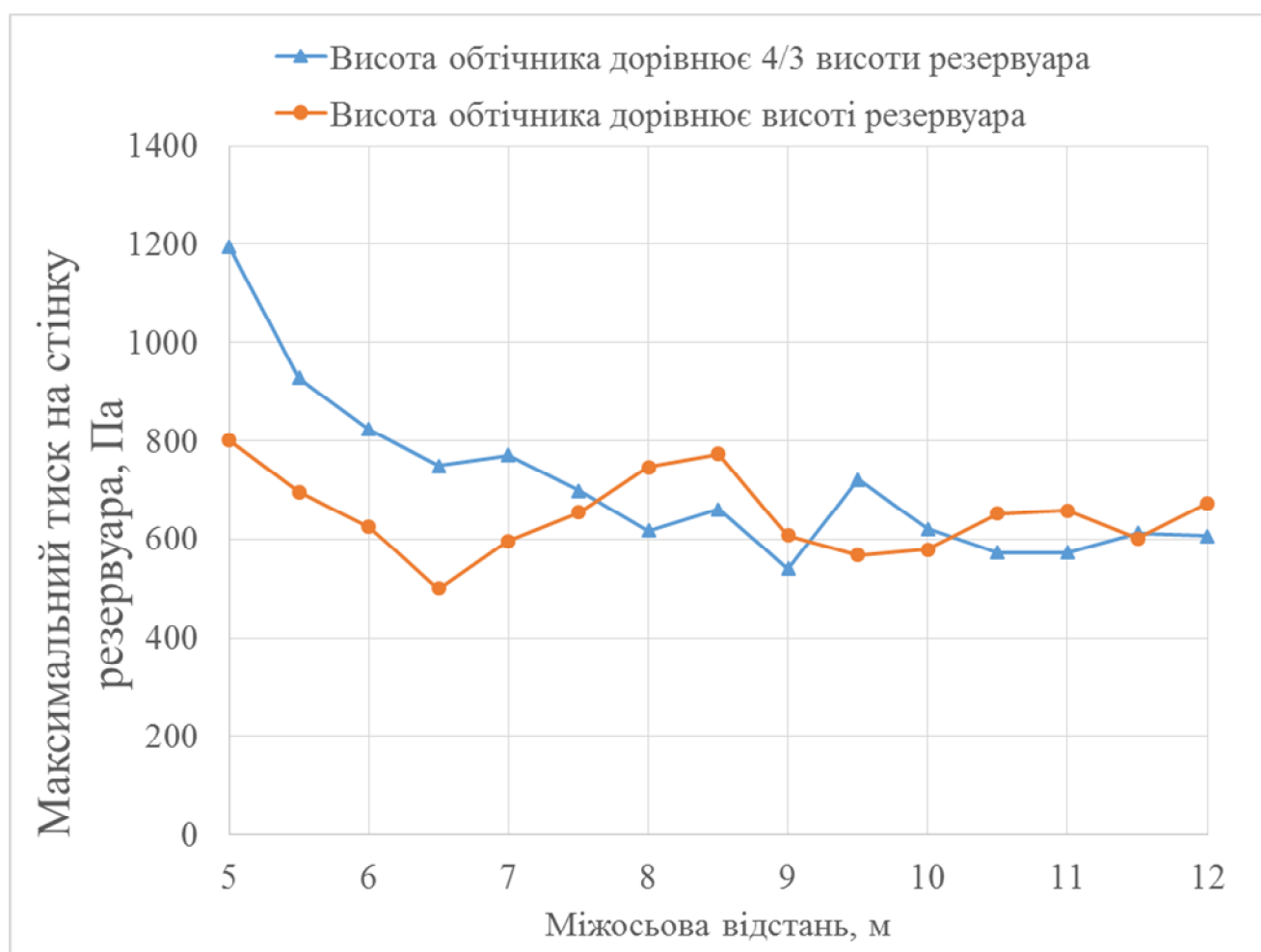


Рисунок 3.15 – Залежність максимального тиску на стінках резервуара від міжосьової відстані для різних за висотою обтічників

Аналіз апроксимацій цих кривих аналітичними виразами (за «Р» позначено максимальний тиск на стінку резервуара, а за «L» – міжосьову відстань) показав

наступне: для опису першого випадку ( $4/3$  висоти резервуара) використовується поліном третього порядку

$$P = -4,7801L^3 + 140,88L^2 - 1379,3L + 5105,1$$

з достовірністю апроксимації  $R^2 = 0,9074$ , а для другого ( $3/3$  висоти резервуара) – більш ніж шостого порядку

$$P = -0,545L^6 + 26,997L^5 - 543,63L^4 + 5682,1L^3 - 32426L^2 + 95520L - 112480$$

з достовірністю апроксимації  $R^2 = 0,6154$ .

Наявність більш простої функціональної залежності між розглянутими параметрами при використанні обтічника з висотою, що дорівнює  $4/3$  висоти об'єкта захисту, дає змогу значно точніше визначати необхідну міжосьову відстань при проектуванні обтічника для резервуара з іншими габаритними розмірами.

3) Залежність максимального тиску на стінках резервуара від діаметра обтічника (рис. 3.16). За основу прийнято визначені у двох попередніх дослідях параметри: зіркоподібна форма, висота рівна  $4/3$  висоти резервуара, міжосьова відстань 9 м. Аналіз рис. 3.16 показує чітку наявність тенденції до зменшення тиску на стінку резервуара при збільшенні діаметра обтічника. Аномалією являються точки  $d=5$  м та  $d=5,5$  м, в яких утворюється низхідний повітряний потік, що створює додатковий тиск на кришку резервуара (рис. 3.17; рис 3.18, вектор швидкості повітряного потоку направлений справа-наліво). Отже, оптимальним з економічної (матеріальної) точки зору значенням діаметра обтічника є значення  $d=2$  м. Для підвищення ефективності (понад 60 % зниження тиску на стінку) розробленого засобу пасивного захисту від вітрового навантаження для окремих резервуарів при певному обґрунтуванні може бути рекомендовано використання обтічників великого діаметру.

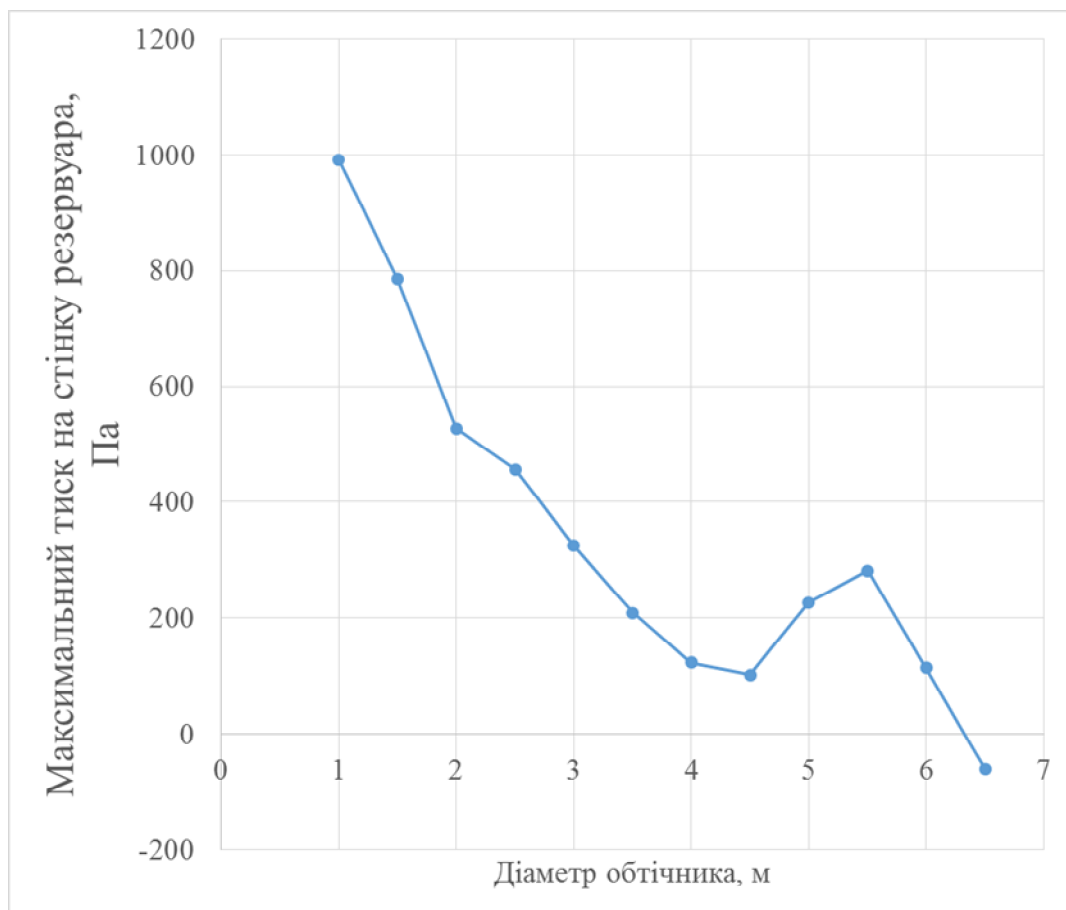


Рисунок 3.16 – Залежність максимального тиску на стінках резервуара від діаметра обтічника

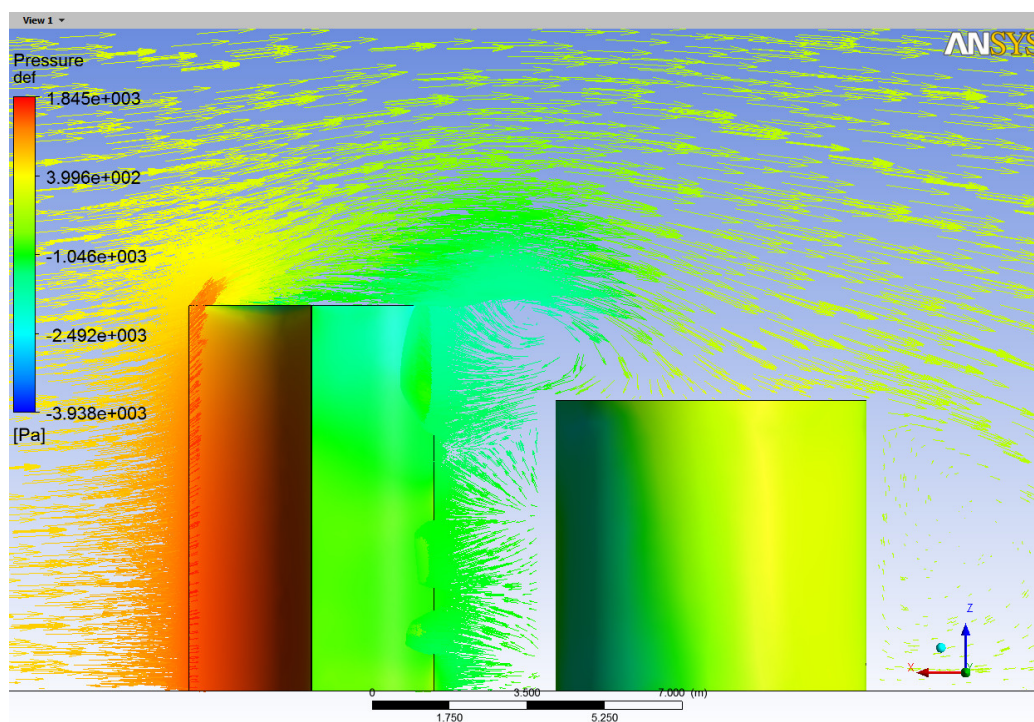


Рисунок 3.17 – Векторне поле тиску у вертикальній площині

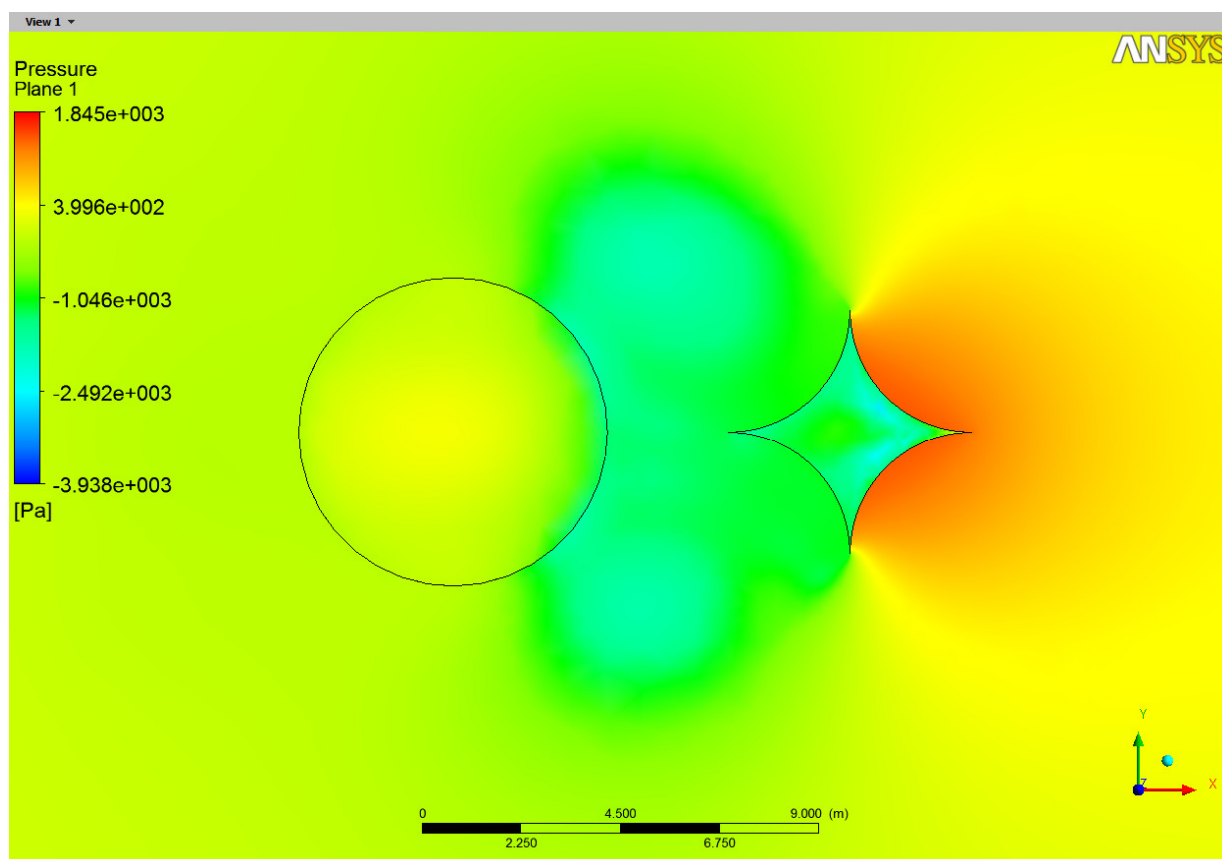


Рисунок 3.18 – Векторне поле тиску у горизонтальній площині

4) Залежність максимального тиску на стінках резервуара від швидкості повітряного потоку (рис. 3.19). За основу прийнято найкращі визначені параметри: зіркоподібна форма, радіус 1000 мм, висота рівна  $\frac{4}{3}$  висоти резервуара, між-осьова відстань 9 м.

Також для порівняння на рис. 3.19 наведено графіки, що відображають результати моделювання без обтічника та з обтічником при наявності наземного фундаменту. Аналіз графіків показав, що зона безпечної експлуатації резервуара з підземним фундаментом розширюється на 45 %, а з наземним спеціальної конструкції – на 64 % при використанні обтічників.

Загалом, як і для ОК з наземним фундаментом, ефективність застосування розробленого засобу пасивного захисту від вітрового навантаження для загального випадку резервуарів з підземним фундаментом (рис. 3.20) знаходиться в межах від 50 % до 70 %, що задовольняє умови, поставлені при проектуванні обтічників – зниження вітрового навантаження з 1339 Па до 800 Па.

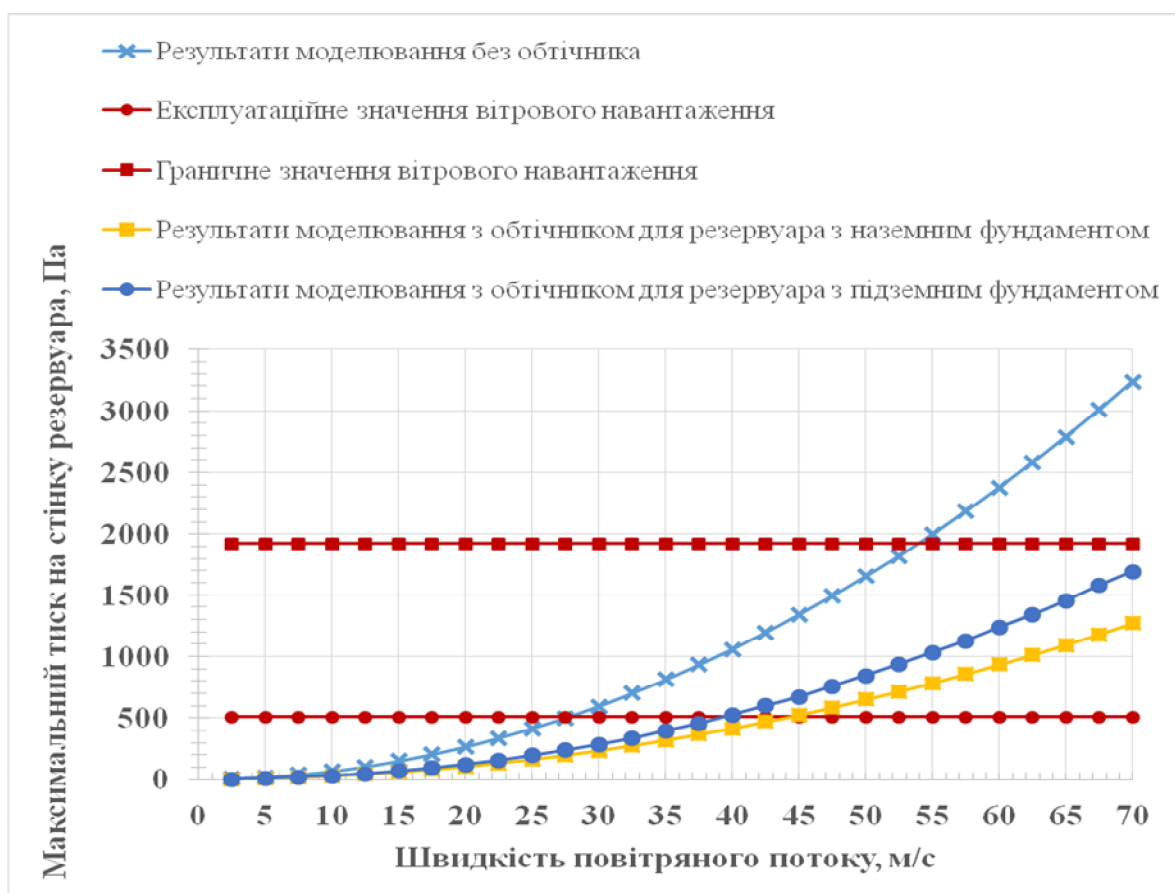


Рисунок 3.19 – Графік залежності максимального тиску на стінку резервуара від швидкості вітру

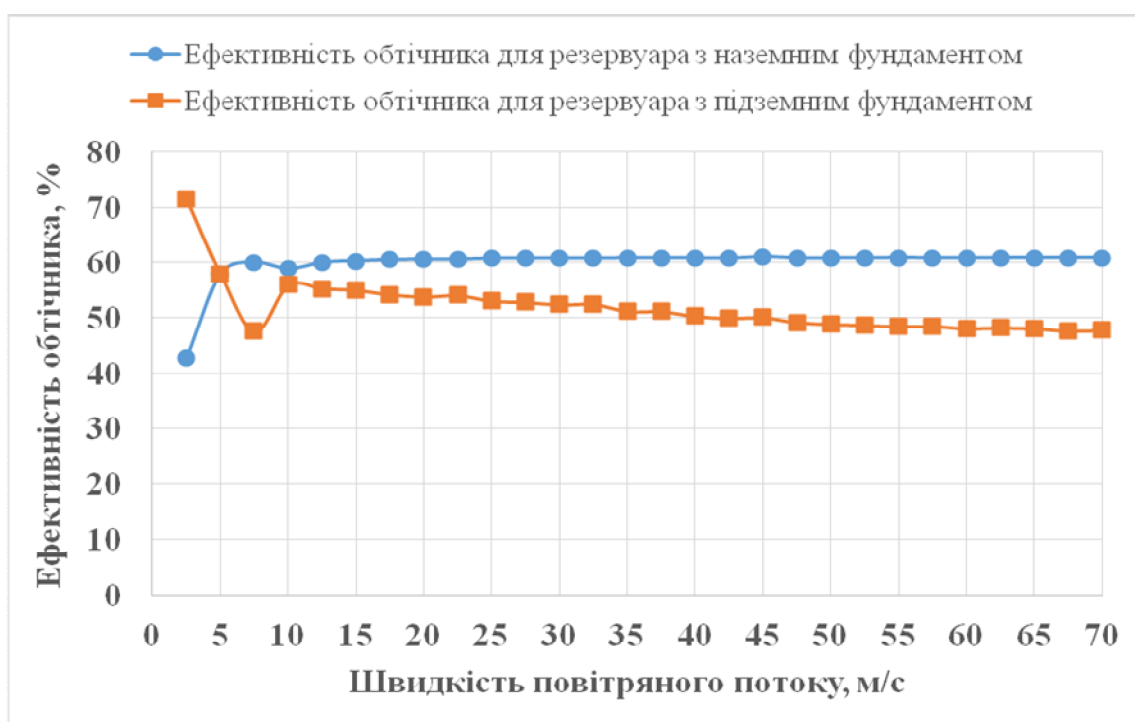


Рисунок 3.20 – Графік залежності ефективного зниження тиску від швидкості вітру

Таким чином, як показали результати імітаційного моделювання, для резервуарів з наземним та підземним фундаментом у якості пасивного захисту доцільно обрати обтічник зіркоподібної форми, ефективність якого складає в середньому 60 % та 52 % відповідно. Результати імітаційного моделювання при  $V=45$  м/с (рис. 3.14-рис.3.16) дозволили отримати наступні функціональні залежності для визначення параметрів обтічника за відомим значенням максимального тиску на стінку резервуара:

$$\begin{cases} P = 739,27h^2 - 2041,5h + 2037,5 \\ P = -4,7801L^3 + 140,88L^2 - 1379,3L + 5105,1, \\ P = -17,521d^3 + 235,95d^2 - 1085,9d + 1902,7 \end{cases} \quad (3.1)$$

де  $h$  – висота об'єкта захисту, м;  $L$  – міжосьова відстань, м;  $d$  – діаметр обтічника;  $P$  – максимальний тиск на стінку об'єкта захисту.

Достовірність апроксимації результатів моделювання для кожного рівняння системи становить  $R^2 > 0,95$ .

За результатами моделювання (рис. 3.19) встановлено функціональні залежності максимального тиску на стінку резервуара при використанні зіркоподібного обтічника

$$P = 0,3823V^2 - 0,005V + 2,1169$$

для резервуара з підземним фундаментом та

$$P = 0,2587V^2 - 0,0264V + 2,0971$$

для резервуара з наземним фундаментом. Достовірність апроксимації в обох випадках  $R^2 = 0,98$ .

Результати наведених у даному розділі досліджень опубліковані в роботах [109-113].

### **Висновки до розділу 3**

1) Для обраного в якості ОК резервуара з наземним фундаментом спеціальної конструкції розроблено засіб пасивного захисту від вітрового навантаження для зменшення величини тиску повітряного потоку на стінку резервуара з навітряної сторони.

2) За допомогою CAD-системи CATIA було побудовано геометричні моделі обтічників наступних форм у їх поперечному перерізі: квадратної, круглої та зіркоподібної. На основі даних обтічників створено 225 складальних одиниць для проведення імітаційного моделювання.

3) У програмному комплексі ANSYS проведено серію імітаційних моделювань з грубою скінчено-елементною сіткою (близько 1 мільйона тетраедрів), у результаті яких було визначено найбільш ефективні конструкції обтічників за показником зниження тиску повітряного потоку з навітряної сторони об'єкта. Для обраних конструктивних схем обтічника (з квадратною та зіркоподібною формами в поперечному перерізі) проведено серію додаткових моделювань з більш якісною (ущільненою в 2 рази) сіткою в діапазоні швидкостей вітрового потоку від 2,5 м/с до 70 м/с.

4) Установлено спрощені функціональні залежності максимального тиску повітряного потоку на стінку резервуара з підземним фундаментом при використанні обтічника зіркоподібної форми від наступних параметрів: діаметра обтічника, його висоти, а також міжосьової відстані. Це дозволяє для заданих значень швидкості повітряного потоку автоматично визначити геометричні характеристики обтічника та місце його встановлення.

5) Показано, що ефективність запропонованого засобу пасивного захисту резервуарів від вітрового навантаження складає понад 60 % для ОК з наземним фундаментом спеціальної форми та понад 50 % для резервуарів з підземним

фундаментом. Визначено, що величину ефективного зниження вітрового навантаження можна покращити шляхом збільшення діаметру обтічника.

6) Установлено, що використання розроблених засобів захисту від вітрового навантаження дозволить розширити зону безпечної експлуатації резервуара з підземним фундаментом на 45 % (до швидкості повітряного потоку 40 м/с), а с наземним спеціальної конструкції – на 64 % (до швидкості повітряного потоку 45 м/с) при використанні обтічників.



## РОЗДІЛ 4

### ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ДІАГНОСТИКИ РЕЗЕРВУАРІВ НА ОСНОВІ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Розроблені за останнє десятиріччя методи, методики та технології діагностування як окремих елементів конструкцій, так і складних інженерних об'єктів, що знаходяться в критичних умовах експлуатації, дозволяють створити діагностичні системи нового класу – комплексні інтелектуальні системи функціональної діагностики конструкцій. Вимоги забезпечення високого рівня вірогідності локалізації дефектів та розпізнавання поточного ТС такими системами, а також наявність великої кількості вихідної інформації обумовлюють створення нових ефективних способів візуалізації даних вимірювань. Тому для вдосконалення системи функціональної діагностики запропоновано, обґрунтовано та розроблено підсистему візуалізації на основі імітаційного моделювання.

Такі стандартні методи візуалізації діагностичної інформації, як гістограми та графіки [50], не завжди дозволяють швидко та ефективно локалізувати місця виникнення надмірних деформацій, тріщин або інших дефектів, що виникають в об'єкті контролю. Саме тому у даному розділі проведено розробку підсистеми візуалізації багатоканальної СРП з використанням можливостей імітаційного моделювання та принципів систем захоплення рухів.

Для оцінки адекватності моделі ОК, яка використовується в підсистемі візуалізації, проведено експериментальні дослідження фізичної моделі ОК та макету каналу вимірювання вібрації.

#### **4.1 Загальна структура системи функціональної діагностики резервуарів**

Моніторинг ТС резервуарів з екологічно-небезпечними речовинами потребує комплексного підходу на основі розробки та застосування діагностичних мо-

делей об'єкта для визначення та прогнозування характеристик напружено-деформованого стану в реальних умовах експлуатації, а також найбільш ефективних для даного об'єкту методів і технічних засобів контролю та діагностики.

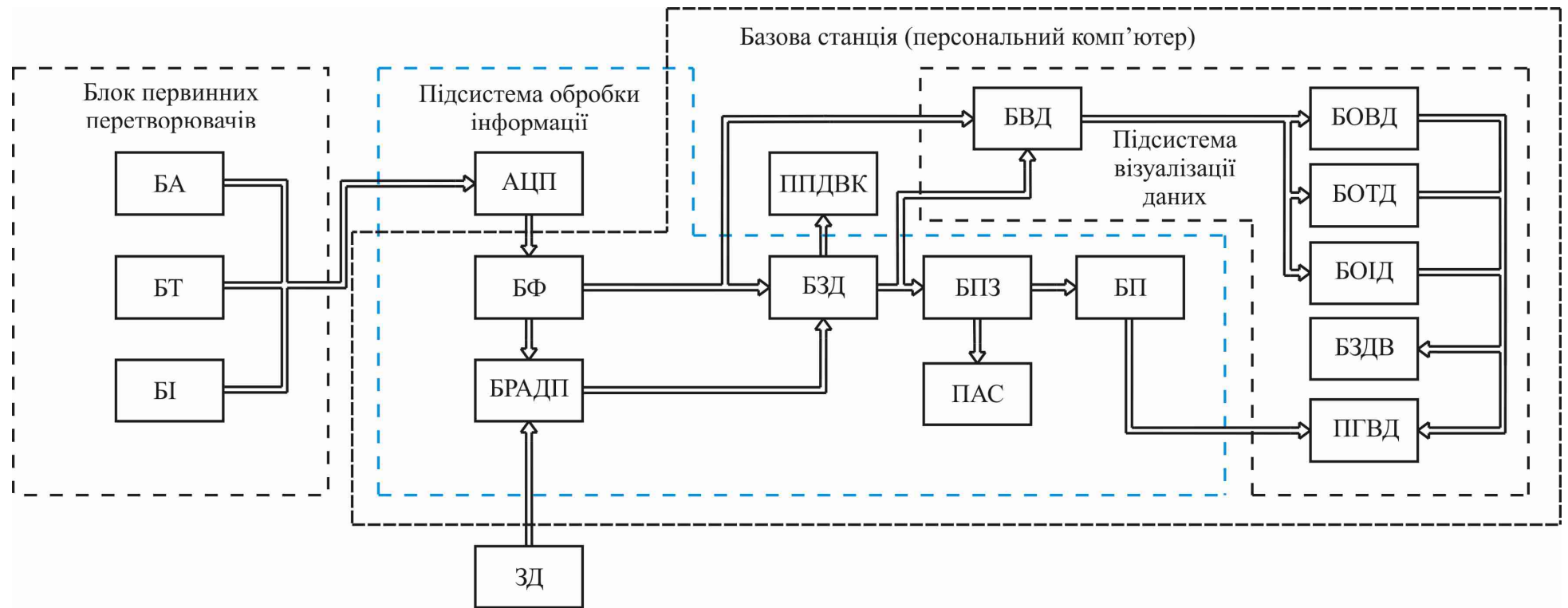
На основі розвитку та комплексного використання методів і засобів неруйнівного контролю, поєднанні специфічних математичних моделей і методів оперативної ідентифікації вібраційних, деформаційних та міцнісних процесів в умовах безпосередніх вимірювань розроблено та запатентовано автоматизовану СРП.

В основу даної СРП покладено комплексний підхід до проблеми контролю функціонального стану резервуарів з паливом в складних кліматичних умовах експлуатації, який забезпечує [107, 114]:

- отримання, аналіз та використання інформації про реальний вібраційний стан конструкції резервуару;
- створення та аналіз математичної моделі резервуару з урахуванням реальних умов динамічних та статичних навантажень для визначення характеристик стійкості та напружень конструкції резервуару;
- отримання інформації про зміну ТС;
- збір та аналіз інформації про вібраційний стан фундаменту, на якому встановлено резервуар, про просторове положення резервуару для визначення ознак зміни динамічного та статичного навантаження на конструкцію резервуару;
- автоматизацію процесу збору, перетворення, зберігання, візуалізації та аналізу діагностичної інформації для прийняття рішення про поточний функціональний стан резервуару та прогнозування його динаміки.

На рис. 4.1 зображено узагальнену функціональну схему, яка пояснює принцип функціонування розробленої СРП:

- Блоком акселерометрів БА, блоком тензорезисторів БТ, блоком інклінометрів БІ здійснюється знаття та реєстрація даних про вібраційний, напружено-деформований стан та просторове положення, які за допомогою АЦП перетворюються у цифровий сигнал;



БА, БТ, БІ – блоки акселерометрів, тензорезисторів та інклінометрів відповідно; АЦП – аналогово-цифровий перетворювач; БФ – блок фільтрів; БРАДП – блок розрахунку та аналізу діагностичних параметрів; ЗД – зовнішні дані; БЗД – блок збереження даних; ППДВК – пристрій передачі даних віддаленому користувачу; БПЗ – блок порогових значень; ПАС – пристрій аварійної сигналізації; БП – блок прогнозу; БВД – блок вибору даних; БОВД, БОТД, БОІД – блоки обробки вібраційних, тензометричних та інклінометричних даних відповідно; БЗДВ – блок збереження даних візуалізації; ПГВД – блок графічного відображення даних

Рисунок 4.1 – Функціональна схема автоматизованої СРП

- цифрові сигнали фільтруються у блоці фільтрів БФ для виділення інформативних складових сигналу;
- відфільтрований сигнал надходить до блоку розрахунку та аналізу діагностичних параметрів БРАДП, в якому проходить обробка вимірюваних сигналів відповідними методами, визначення діагностичних ознак, розрахунок параметрів ТС ОК; при необхідності в блок розрахунку вводяться зовнішні дані ЗД, наприклад, величина динамічних збурень, що діють на ОК, ці дані можуть передаватися як у вигляді файлів так і в потоковому режимі від зовнішньої системи;
- дані з блоку фільтрів БФ, блоку розрахунку та аналізу діагностичних параметрів БРАДП надходять до блоку збереження даних БЗД, де зберігаються у вигляді файлів з унікальними іменами;
- файли з даними вимірювань з блоку збереження даних БЗД можуть бути передані за допомогою пристрою передачі даних віддаленому користувачу ППДВК;
- файли з даними вимірювань з блоку збереження даних БЗД надходять до блоку порогових значень БПЗ, де проходить порівняння величини діагностичних параметрів з їх пороговими значеннями;
- у випадку, коли діагностичні параметри перевищують свої граничні значення спрацьовує пристрій аварійної сигналізації ПАС;
- у блоці прогнозу БП відбувається накопичення значень діагностичних параметрів та побудова часових залежностей у вигляді трендів з екстраполяцією результатів для кожного окремого діагностичного параметра;
- з блоку фільтрів БФ та блоку збереження даних БЗД сигнали та файли з даними надходять до блоку вибору даних БВД, який у залежності від рішень людини-оператора визначає у якому вигляді буде проходити їх візуалізація, а саме: в он-лайн режимі або шляхом зчитування даних з файлу для більш детального їх аналізу;
- у блоці обробки вібраційних даних БОВД за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення проходить частотний та частотно-часовий

аналіз сигналів вібрації з формуванням графічних звітів у вигляді графіків, схем, тощо;

- у блоках обробки тензометричних (БОТД) та інклінометричних (БОІД) даних за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення проходить формування імітаційної моделі ОК для відображення на ній величини напружень та кутового положення, а також формування графічних звітів у вигляді графіків, схем, тощо;
- блок збереження даних візуалізації БЗДВ слугує для збереження окремих графіків та рисунків для подальшого дослідження та порівняння;
- дані з блоку прогнозу БП, блоку обробки вібраційних даних БОВД, блоків обробки тензометричних (БОТД) та інклінометричних (БОІД) даних передаються на пристрій графічного відображення даних ПГВД, в якому відбувається візуалізація даних вимірювань у вигляді графіків, діаграм та імітаційних моделей.

Канали зв'язку є основою будь-якої діагностичної системи, необхідні характеристики каналів формуються шляхом раціонального вибору елементів і значною мірою залежать від типів датчиків первинної інформації та місць їх установки на об'єкті. У сучасних системах функціональної діагностики використовуються датчики для реєстрації різних фізичних процесів, які є реакцією матеріалу конструкції на вплив, що призводить до пошкодження. Головними вимогами до датчиків первинної інформації є вимоги точності, чутливості, високої надійності, мініатюрності та можливості бути інтегрованими в конструкцію ОК. Можливість використання конкретного типу датчика визначається не тільки відповідністю зазначеним вище вимогам, а й з урахуванням специфіки ОК, наприклад, для розглянутої вище системи обрано акселерометри, тензорезистори та інклінометри.

Для резервуарів з наземним фундаментом при комплексуванні акселерометра та інклінометра з подальшим їх встановленням на фундаменті можна визначити величину малих лінійних переміщень фундаменту за наступною методикою:

- вимірювачі віброприскорень (акселерометри) та кутового положення (інклінометри) встановити в одній площині на елементі конструкції об'єкта;
- виміряти кут відхилення площини установки вимірювача від площини горизонту;
- сигнал віброприскорення скорегувати на величину, пропорційну кутовому відхиленню;
- сигнал віброприскорення посилити, відфільтрувати у необхідній смузі частот та шляхом інтегрування перетворити у сигнал віброшвидкості;
- сигнал віброшвидкості посилити, відфільтрувати в необхідній смузі частот та шляхом інтегрування перетворити в сигнал вібропереміщення;
- сигнал вібропереміщення додатково відфільтрувати у необхідній смузі частот з максимальним коефіцієнтом затухання в смузі затримки та посилити на величину, визначену експериментально при відомих значеннях переміщень;
- визначити фактичну величину лінійних переміщень об'єкта по постійній складовій вібросигналу, яка залишилася після фільтрації.

Таким чином, даний спосіб дозволяє визначити не тільки величину лінійних переміщень фундаменту, а й причину їх виникнення (зміна лінійного або кутового положення), що можна вважати достатнім для практичного використання. На описаний спосіб отримано патент України на корисну модель.

Таким чином, в розглянутій СРП вирішується діагностична задача, що дозволяє на ранніх стадіях розвитку руйнівних процесів здійснити прогнозну оцінку ТС ОК (завдяки побудові трендів з екстраполяцією результатів для кожного окремого діагностичного параметра), і реалізувати комплекс превентивних заходів по попередженню руйнування об'єкта. Основними відмінностями даної СРП від подібних систем є: комплексність, багатоканальність, підсистема візуалізації даних на основі імітаційного моделювання. На розглянуту СРП отримано 2 патенти України на корисну модель.

## 4.2 Завдання візуалізації даних в системі функціональної діагностики

Для створення ефективного алгоритмічного та програмного забезпечення для інформаційно-діагностичного комплексу або СРП на основі імітаційного моделювання та подальшої функціональної діагностики необхідне розуміння фізичної сутності процесів, які протікають в ОК та призводять до появи діагностичних сигналів. Тому за результатами інструментальних досліджень об'єкта будується його діагностична модель, яка встановлює зв'язок між простором його станів і простором характеристик різноманітних діагностичних сигналів [44]. Остаточний вибір діагностичних параметрів проводиться після того, як встановлено їх взаємозв'язок з контрольованими технічними характеристиками ОК (наприклад, за допомогою імітаційного моделювання), що знаходиться в тому чи іншому стані. В якості діагностичних слід вибирати лише ті параметри, які істотно змінюються при переході ОК з одного стану в інший.

Коли усі діагностичні параметри, які є вихідними даними первинних перетворювачів та вхідними даними підсистеми візуалізації, обрані та виміряні, вони передаються до відповідних блоків обробки вібраційних, тензометричних та інклінометричних даних (БОВД та БОТІД).

Підсистема візуалізації поточного та прогнозного стану об'єкта має виконувати наступну сукупність операцій [51]:

- перетворення вихідних даних та їх введення в імітаційну модель;
- візуальне уявлення елементів модельованого об'єкта і управління моделлю (параметричне геометричне моделювання);
- імітація взаємодії елементів конструкції (імітаційне моделювання);
- візуальне відображення результатів моделювання.

Виходячи з зазначеного вище, основним призначенням елементів підсистеми візуалізації (рис. 4.2) буде:

1) Для модуля управління з інтерфейсом користувача:

- отримання вихідних даних з інших підсистем інформаційно-діагностичного комплексу (СРП) або безпосередньо з датчиків;

- перетворення отриманих даних та їх введення в імітаційну модель;
- забезпечення взаємодії елементів підсистеми візуалізації та керування процесом моделювання як геометричного, так і імітаційного;
- відображення результатів (візуалізація).

2) Для моделі об'єкта контролю:

- реалізація модельного подання досліджуваного об'єкта (геометричне моделювання з необхідною точністю);
- візуальне подання результатів моделювання у вигляді, зручному для сприйняття і подальшого аналізу.

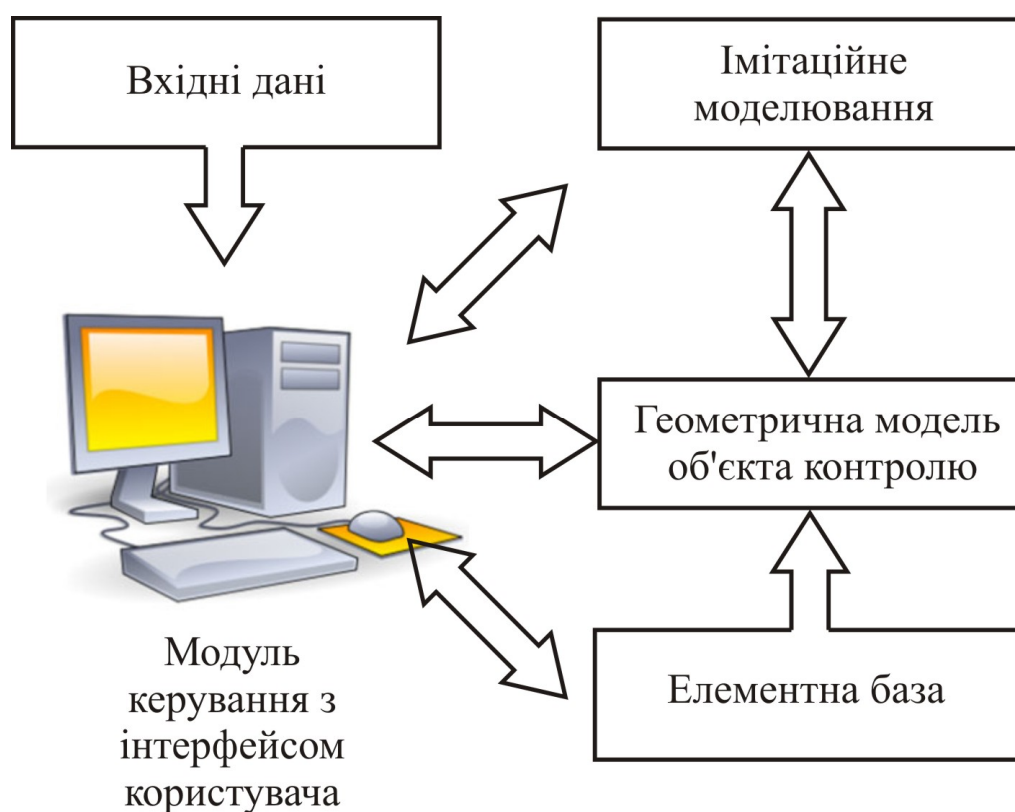


Рисунок 4.2 – Ілюстрація функціональних можливостей підсистеми візуалізації

3) Для елементної бази:

- зберігання геометричних моделей основних елементів конструкції (клапани, патрубки, люки, тощо) для зміни основної моделі при різних видах аналізу.



#### 4) Для імітаційного моделювання:

- проведення необхідних обчислювальних процесів по перетворенню даних вимірювань з первинних перетворювачів;
- передача даних на модель об'єкта контролю для візуалізації;
- розрахунок та використання статистичних даних по кожному з діагностичних параметрів для здійснення та візуалізації прогнозу зміни ТС ОК через певний проміжок часу.

Реалізувати таку підсистему можливо за принципом, який використовують системи реєстрації та візуалізації руху (також їх часто називають системами захоплення руху). Вони з'явилися наприкінці 80-х - початку 90-х років минулого століття і застосовувалися, в основному, при створенні анімації у фільмах. Вдосконалення технологій захоплення руху і тривимірної графіки, а також програмного забезпечення привело до появи ідеї про впровадження цього принципу в діагностичну апаратуру.

У наш час існує безліч спеціальних графічних пакетів для створення 3D-анімації за допомогою спеціальних функцій, але найбільш природна передача переміщень елементів конструкції виходить саме при використанні систем захоплення руху. Для обробки (перетворення) даних, отриманих в результаті вимірювань на об'єкті, можна використовувати і вищевказані графічні пакети, але для впровадження у діагностичну апаратуру необхідно розробити алгоритмічне та програмне забезпечення, що є спеціально адаптованим під візуалізацію даних комплексних вимірів (наприклад, напружень та кутових переміщень об'єкта).

### 4.3 Інформаційна модель підсистеми візуалізації даних

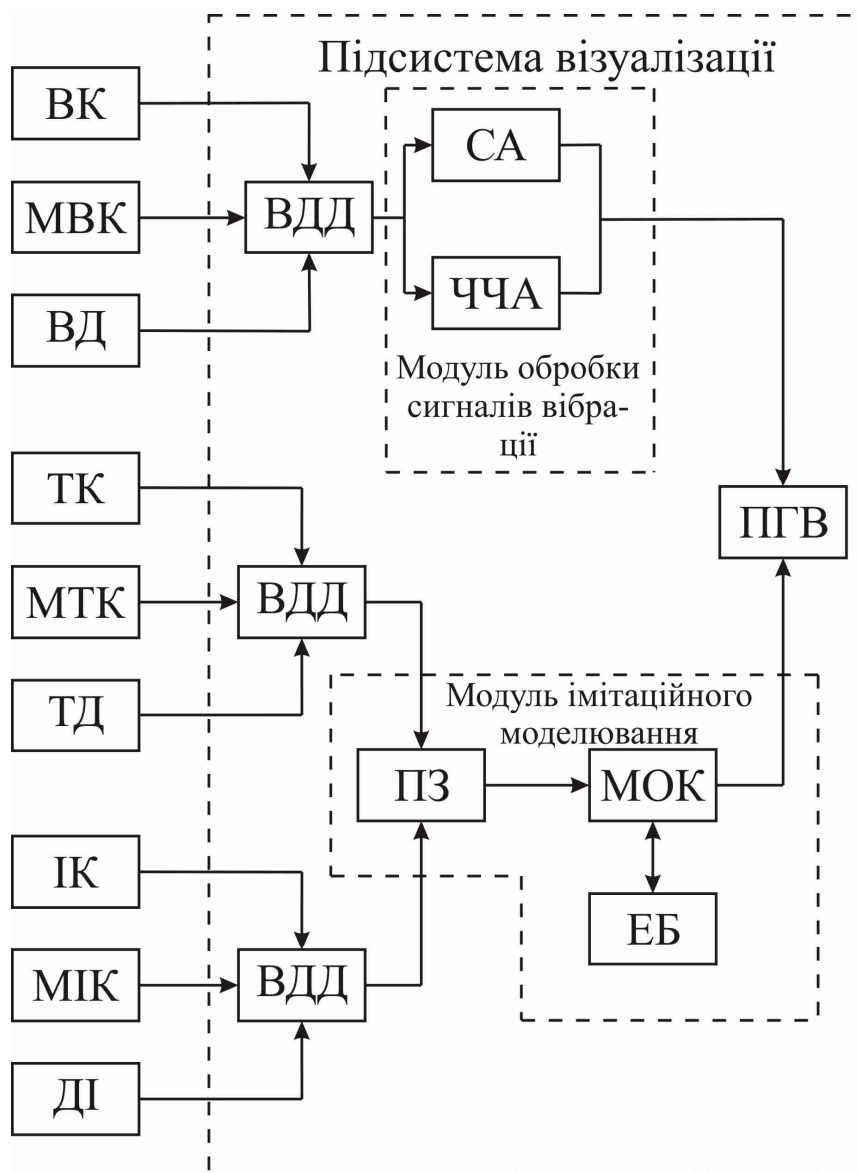
Сучасні програмні та апаратні засоби пропонують широкий спектр можливостей вирішення задач моделювання. Головною проблемою при побудові будь-якої системи візуалізації на основі імітаційного моделювання для систем функціональної діагностики є необхідність розробки спеціалізованого програмного забезпечення. У сучасних засобах імітаційного моделювання ця проблема вирішу-

ється за допомогою автоматизації побудови коду на основі графічних систем (геометричних моделей) і з використанням методів об'єктно-орієнтованого програмування. Даний підхід значно полегшує процес створення адекватних імітаційних моделей для використання в системах функціональної діагностики і робить їх більш зрозумілими для людини-оператора. Саме тому система функціональної діагностики, побудована на основі імітаційного моделювання, може поєднувати у собі різні алгоритми моделювання (математичне, геометричне і т.д.) і проводити операції безпосередньо з інформативними властивостями моделі ОК.

Для розкриття особливостей функціонування, опису істотних параметрів підсистеми візуалізації, а також зв'язків між ними створено її інформаційну модель (рис. 4.3). Дана модель передбачає наявність зовнішніх (вхідних) даних, які, відповідно до розробленої функціональної схеми СРП (рис. 4.1), є сигналами з трьох типів первинних перетворювачів: акселерометра (ВК), тензорезистора (ТК) та інклінометра (ІК).

Окрім використання датчиків, як джерела інформації, необхідної для функціонування підсистеми візуалізації, можуть також використовуватися математичні моделі каналів вібрації, тензометрії та інклінометрії (МВК, МТК, МІК відповідно) або файли з вібраційними (ВД), тензометричними (ТД) та інклінометричними (ІД) даними, отриманими, наприклад, за допомогою інших діагностичних систем на даному ОК або для візуалізації окремого найбільш інформативного набору виміряних даних.

Обробка вхідних даних розділена на два окремих модуля. Модуль обробки сигналів вібрації включає в себе спектральний (СА) та частотно-часовий (ЧЧА) аналіз вхідних сигналів вібрації. Модуль імітаційного моделювання призначений для перетворення вхідних тензометричних та інклінометричних даних спеціалізованим програмним забезпеченням (ПЗ) у відповідні візуальні зміни моделі ОК (МОК). Для забезпечення повноти аналізу модель ОК може доповнюватися або спрощуватися за допомогою моделей елементів конструкції що містяться у елементній базі (ЕБ).



ВК – вібраційний канал; MBK – модель вібраційного каналу; ВД – вібраційні дані; ТК – тензометричний канал; МТК – модель тензометричного каналу; ТД – тензометричні дані; ІК – інклінометричний канал; МІК – модель інклінометричного каналу; ДІ – дані інклінометрії; ВДД – вибір джерела даних; СА – спектральний аналіз; ЧЧА – частотно-часовий аналіз; ПЗ – спеціалізоване програмне забезпечення; МОК – модель об’єкта контролю; ЕБ – елементна база; ПГВ – пристрій графічного відображення

Рисунок 4.3 – Інформаційна модель підсистеми візуалізації

Пристрій графічного відображення (ПГВ) призначений для візуалізації результатів перетворень вхідних даних у інтуїтивно зрозумілий для людини-оператора вигляд.

#### 4.4 Розробка алгоритмічного забезпечення для підсистеми візуалізації

Маючи інформаційну модель з описанням основних принципів, які мають бути реалізовані в підсистемі візуалізації для її інтеграції в СРП, необхідно розробити основний алгоритм, тобто набір інструкцій, що описують порядок необхідних для досягнення результату дій. У загальному випадку алгоритм необхідно скласти таким чином, щоб програмне забезпечення на його основі можна було написати будь-якою мовою програмування.

Оскільки СРП може функціонувати автоматично та автономно без присутності людини-оператора, розробка програмного забезпечення буде проводитися для візуалізації записаних у файл даних. У цьому випадку може знадобитися створення одного чи декількох класів для спрощення коду шляхом зменшення кількості виконуваних дій при затримці на пристрої відображення результату вимірювань.

Як видно з інформаційної моделі, підсистема візуалізації містить два модуля, для кожного з яких необхідно розробити алгоритмічне та програмне забезпечення.

Головним призначенням програми візуалізації вібраційних даних є обробка (перетворення) записаних у файл вихідних даних для побудови графіків амплітудно-частотних та частотно-часових залежностей з урахуванням особливостей запису даних у файл, параметрів АЦП (розрядність, вхідний діапазон), кількості вимірювальних каналів, тощо. Загальний алгоритм програми візуалізації вібраційних даних зображено на рис. 4.4.

Головним призначенням програми візуалізації комплексних вимірювань напружень та кутового положення об'єктів є обробка (перетворення) записаних у файл вихідних даних для коректного їх відображення на імітаційній моделі ОК з урахуванням особливостей запису даних у файл, параметрів АЦП (розрядність, вхідний діапазон), кількості первинних перетворювачів, яка впливає на кількість елементів тривимірної моделі для відображення даних, тощо. Алгоритм програ-

ми візуалізації комплексних вимірювань напружень та кутового положення об'єктів зображено на рис. 4.5.

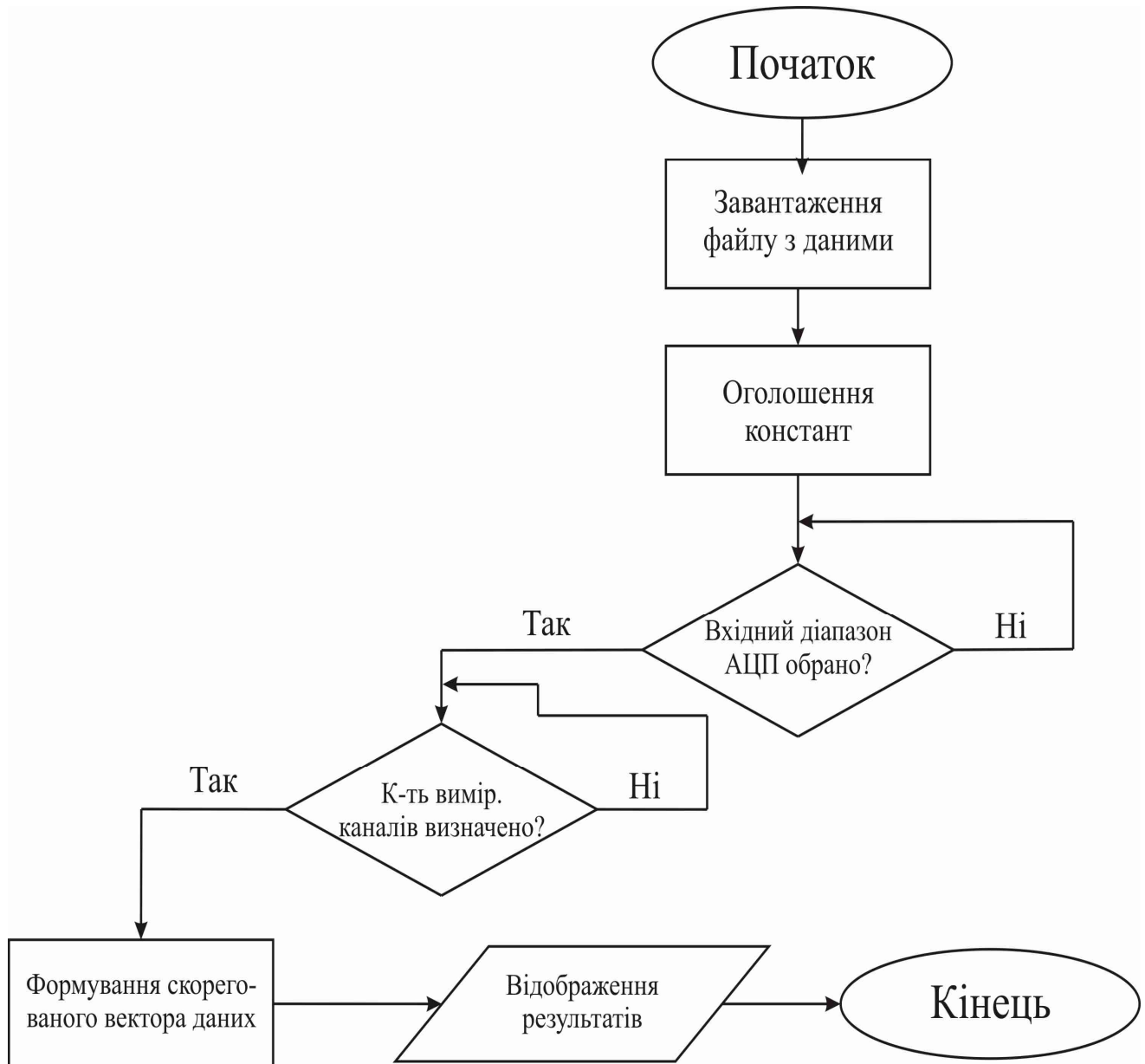


Рисунок 4.4 – Алгоритм програми візуалізації даних вібраційних вимірювань

Оскільки визначено набір інструкцій, необхідних для візуалізації даних вимірювань вібрації, кутового положення та напружень, необхідно розробити відповідне програмне забезпечення для використання в підсистемі візуалізації СРП.

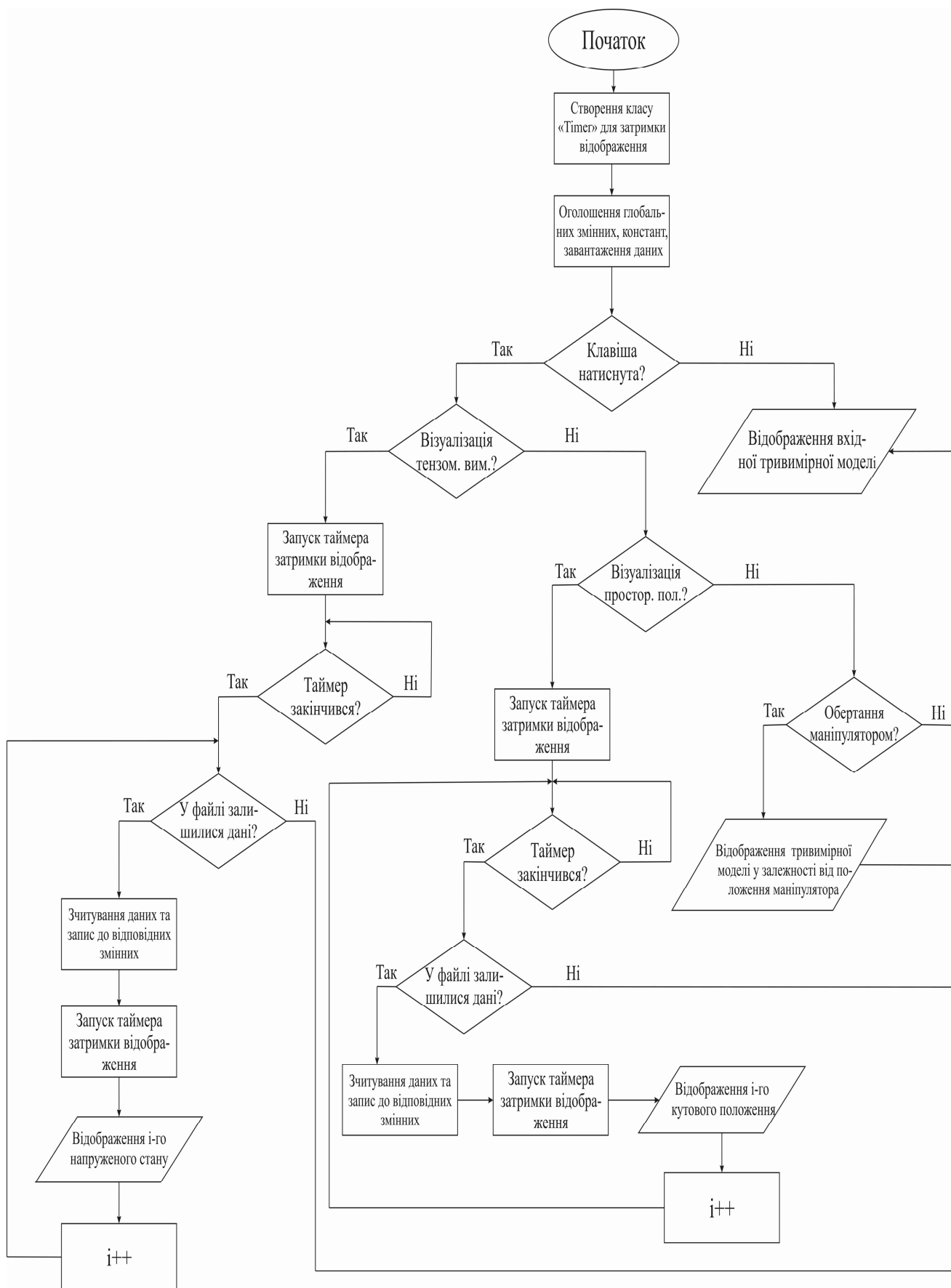


Рисунок 4.5 – Алгоритм програми візуалізації даних комплексних вимірів напружень та кутового положення об'єктів

## **4.5 Розробка програмного забезпечення для підсистеми візуалізації**

### **4.5.1 Середовище програмування Processing**

Мови програмування, як і людські мови, об'єднуються в групи споріднених мов. Processing – це діалект мови програмування під назвою Java [115, 116]; він має майже той же синтаксис, але доповнений спеціальними командами для роботи з графікою і зовнішніми пристроями. Processing містить в собі особливості багатьох мов програмування і тому може послужити хорошим введенням в програмування на інших мовах з використанням інших інструментів розробки.

Processing розроблявся досить довго: з серпня 2002 по квітень 2005 він перебував у стадії альфа-версії, а потім розповсюджувався в стадії бета-версії до листопада 2008. Протягом цього часу він постійно використовувався для навчання та створення програм тисячами людей по всьому світу. Протягом цього часу мова, середовище розробки та спосіб подачі матеріалу безперервно удосконалювалися. 29 листопада 2008 вийшла версія 1.0. Це була перша стабільна версія мови.

Як і будь-яке програмне забезпечення Processing складається з великої кількості компонентів, які працюють разом. Він може бути використаний як для простих виробів, так і для докладного дослідження. Програма на Processing може становити від одного до декількох тисяч рядків коду, тому завжди можна поліпшити і розширити її функціонал. Існує більше 100 бібліотек розширення, що дозволяють застосовувати Processing для обробки звуку, досліджень в області машинного зору і технічних розрахунків. Графічні об'єкти Processing споріднені системі PostScript, що послужила основою для формату PDF і OpenGL (графічна бібліотека для написання додатків, що використовують 3D-графіку).

Завдяки великій кількості переваг, широкому функціоналу та простоті користування готовою програмою саме мова програмування Processing була обрана для створення основної частини програмного забезпечення для візуалізації тензориметричних та інклінометричних вимірювань.

### 4.5.2 Написання основного коду програми

На рис. 4.6 зображено середовище розробки Processing. Воно виглядає наступним чином: більшу частину вікна займає текстовий редактор 1, над ним знаходиться ряд кнопок – це панель інструментів 2. Під текстовим редактором знаходиться область виведення повідомлень 3, нижче – консоль 4. В області виводу повідомлень відображаються повідомлення у реальному часі, а консоль використовується для спеціальних задач.

В текстовому редакторі середовища програмування записується код програми. Кожна програма починається з імпорту необхідних бібліотек розширення. Для цього необхідно попередньо завантажити та інсталювати кожну бібліотеку. Для програми візуального відображення (візуалізації) результатів комплексних вимірювань напружень та кутового положення об'єктів достатньо використати лише бібліотеку роботи з тривимірними геометричними моделями «OBJLoader».

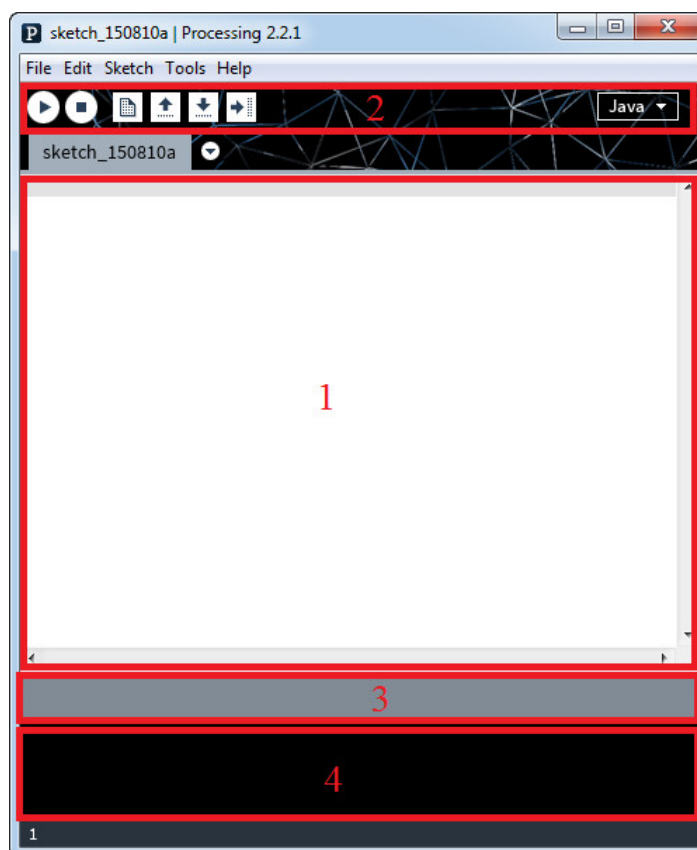


Рисунок 4.6 – Середовище розробки Processing



Після інсталяції використати дану (як і будь-яку іншу) бібліотеку можна двома шляхами: за допомогою головного меню (рис. 4.7) або за допомогою запису в текстовому редакторі рядка `«import saito.objloader.*;»`, де `import` – функція мови Processing; `saito.objloader` – спеціальна назва імпортованої бібліотеки розширення; `«.*/code>»` –пунктуація мови Processing, необхідна для імпорту бібліотек розширення.

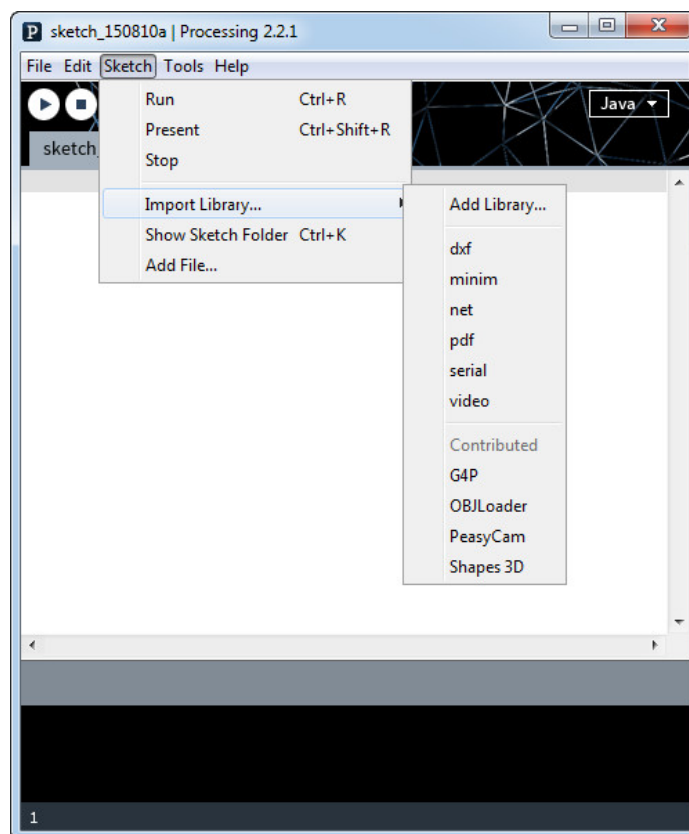


Рисунок 4.7 – Імпорт бібліотек розширення у програму

Тіло написаної мовою Processing програми, що побудована по розробленому вище алгоритму, складається з двох основних функцій – `«setup()»` та `«draw()»`. Код, записаний у блоці `«draw()»`, виконується зверху вниз, а потім повторюється до тих пір, доки оператор не завершить програму, натиснувши кнопку `«Stop»` або зачинивши вікно. Кожне виконання коду в функції `«draw()»` називається кадр і за замовчуванням частота дорівнює шістдесяти кадрам в секунду [116].

Саме тому необхідно створити новий клас (комбінацію полів (даних) і методів (функцій, які є частинами класу), які можуть бути використані в якості

об'єктів) для затримки відображення кожного дискретного значення вимірної величини. Створення класу розпочинається з ключового слова «class», а також його назви, наприклад, «class Timer», після чого в дужках {} записується принцип функціонування даного класу, оголошуються функції або процедури, що відносяться до даного класу та наводяться їх алгоритми.

Наступним кроком є оголошення глобальних змінних, серед яких будуть використовуватися певні типи даних, а саме: таймери («Timer» з розробленого класу), таблиці («Table»), цілі («int») та дійсні («float») числа, boolean (повертає тільки значення «true» та «false»), а також тривимірні геометричні об'єкти («OBJModel» з використаної бібліотеки розширення).

Як доповнення до функції «draw()» існує функція «setup()», яка виконується одноразово при запуску програми. Код всередині функції «setup()» використовується для оголошення початкових значень глобальних змінних, у тому числі тривимірних геометричних моделей, таймерів, таблиць, тощо.

Першим рядком функції «setup()» має бути функція «size()», яка задає розміри вікна програми в пікселях. Якщо функція «size()» не задана, то відкриється вікно зі стандартними розмірами 100x100 пікселів. Для програми візуалізації необхідно задати наступні параметри вікна: size(700, 700, OPENGLE). Перших два параметра – це відповідно ширина та висота, а третій параметр «OPENGLE» вказує на те, який рендерер використовується для роботи з графікою. Рендерер – це комп'ютерна програма, що створює цифрове растрове зображення по тривимірній віртуальній моделі об'єкта з урахуванням властивостей приписаного об'єкту матеріалу, текстур і джерел світла [117]. На даний момент в Processing представлені три рендерера: P2D (Processing 2D) для роботи з двовимірною графікою, P3D (Processing 3D) та OpenGL для роботи з тривимірною графікою.

Після того як робоча область розміром 700x700 пікселів задана, можна призначати початкові значення усіх глобальних змінних, наприклад, змінна з цілочисельним типом даних «X=0;», тощо.

Реалізувати обертання тривимірної моделі маніпулятором у програмному середовищі Processing можна, наприклад, за допомогою відслідковування поло-

ження мишки, використовуючи функцію «mouseDragged()» поза блоками «setup()» та «draw()». Ця функція починає виконуватися при натисканні будь-якої кнопки мишки та її одночасному переміщенні. Програмний код виглядає наступним чином:

```
void mouseDragged() {
    rotX += (mouseX - pmouseX) * 0.015;
    rotY -= (mouseY - pmouseY) * 0.015;}

```

Тут «rotX» та «rotY» – глобальні змінні типу даних «float», які містять значення величини обертання моделі; mouseX та mouseY – змінні, які містять в собі поточну горизонтальну та вертикальну координату відповідно; pmouseX та pmouseY – змінні, які містять в собі попередню горизонтальну та вертикальну координату відповідно.

Реалізація виконання будь-яких дій при натисканні клавіші на клавіатурі здійснюється за допомогою функції «keyPressed()». Оскільки програмне забезпечення, згідно до його алгоритму, передбачає наявність тензометричних та даних про кутове положення об'єкта, необхідно реалізувати два незалежних типи візуалізації, тобто необхідно задати дві клавіші, наприклад, «t» для тензометричних та «r» для інклінометричних вимірювань.

Завдяки особливостям використаної бібліотеки розширення, імпортована геометрична модель має властивості матеріалу конструкції. Якщо вони ввімкнені «modelMaterial = true;», то відображається колір матеріалу, якщо ні «modelMaterial = false;» – колір із палітри RGB (Red – червоний, Green – зелений, Blue – синій), заданий функцією «fill()», яка заповнює ним всю поверхню певного елемента.

Отже, при натисканні клавіші «t» першочергово відбувається перевірка матеріалу конструкції, а саме: якщо він був увімкнений, вимикається і навпаки. У першому випадку додатково у відповідну змінну у циклі записуються дані по першому каналу з файлу, а також запускається таймер затримки відображення цих даних на геометричній моделі. При необхідності дану частину програмного

кода можна розширити на необхідну кількість елементів конструкції і відповідних результатів вимірів по кожному каналу даних.

За допомогою функції «keyPressed()» також можна реалізувати відображення кутового положення ОК після натискання клавіші «r», що запускає таймер затримки відображення відхилення геометричної моделі по трьом осям від їх попередніх положень. Значення кутів повороту по осям «X», «Y», «Z» записуються з файлу даних у відповідні змінні у циклі. Як для тензометричних, так і для інклінометричних вимірювань візуалізація відбувається при кожному виконанні циклу до тих пір, поки у файлі з результатами вимірів присутні дані.

Програмування блоку «draw()» розпочинається з набору стандартних функцій, які встановлюють, наприклад, певний фон. Такі функції задаються в самому початку адже вони можуть повністю переписати вміст вікна програми, оскільки рядки коду виконуються послідовно. Отже, блок «draw()» розпочинається з функцій «background(0)», «lights()», «translate(width/2, height/2, 0)», «rotateX(rotY)», «rotateY(rotX)», які відповідно виконують наступні дії: встановлення чорного фону, стандартне освітлення, переміщення геометричної моделі в центр вікна, зміна кутового положення тривимірної моделі маніпулятором за допомогою створеної раніше функції «mouseDragged()».

Далі, у залежності від натиснутої на клавіатурі клавіші, виконуються функції для візуалізації даних тензометричних та інклінометричних вимірювань. Окрему увагу слід приділити випадку, коли жодна задана клавіша на клавіатурі не натиснута. У цьому разі відбувається лише виконання методу «draw()» для кожного елементу конструкції без виконання будь-яких інших функцій, що призводить до відображення тільки геометричної моделі у своєму первозданному стані.

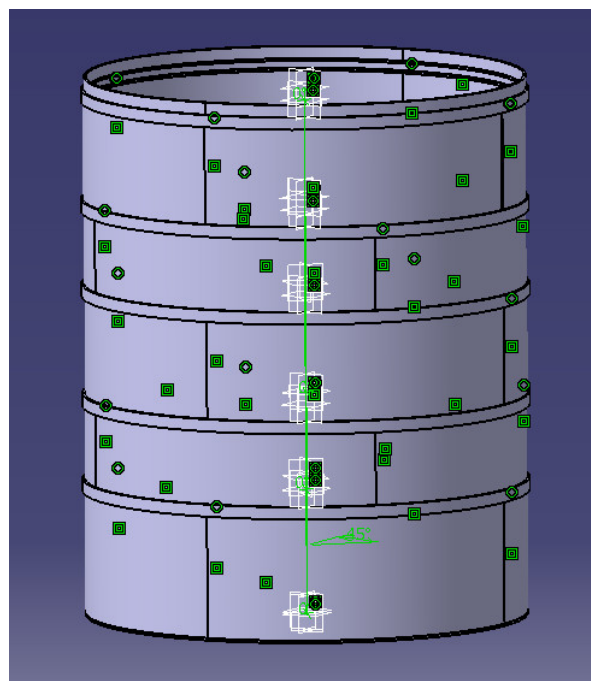
Таким чином, на основі побудованого алгоритму мовою Processing розроблено програмне забезпечення для візуалізації даних вимірювань напружень та кутового положення об'єктів. Наступним кроком є створення геометричної моделі ОК та вдосконалення (розширення) програмного коду для підтримки більшої кількості елементів конструкції.

### 4.5.3 Особливості створення геометричної моделі об'єкта для використання у підсистемі візуалізації

Для дослідження ефективності розробленого програмного забезпечення використаємо фізичну модель ОК. У якості фізичної моделі ОК було обрано вертикальний сталевий резервуар циліндричної форми об'ємом  $0,04 \text{ м}^3$  (рис. 4.8,а). Резервуари подібного типу найчастіше використовуються для зберігання екологічно-небезпечних речовин, таких як: нафта або нафтопродукти, хімікати, токсичні речовини, гази [114]. Для зазначеної фізичної моделі резервуара була створена спрощена тривимірна модель в графічному пакеті САПІА (рис. 4.8,б). Спрощення моделі полягає у виключенні з розгляду деяких елементів конструкції (наприклад, ручок і затискачів кришки) для оптимізації співвідношення час розрахунку/точність результатів при імітаційному моделюванні. Геометричні моделі відомих концентраторів напружень можуть зберігатися в елементній базі (рис. 4.2) і вводитись в основну модель за необхідності.



а)



б)

а) вертикальний сталевий резервуар; б) геометрична модель

Рисунок 4.8 – Модель об'єкта контролю

Модель ОК складається з п'яти поясів та п'яти ребер жорсткості, які чергуються між собою. Ребра жорсткості виконані у вигляді одного елементу конструкції, а кожен пояс розбито на чотири рівні частини (сегменти), на кожній з яких буде встановлюватися тензометричний вимірювач. Отже, всього двадцять елементів конструкції (п'ять поясів по чотири елементи кожен) необхідно використовувати для візуалізації напружень на тривимірній моделі. Загалом геометрична модель РВС складається з двадцяти семи елементів з урахуванням ребер жорсткості, дна та шостого поясу (для закріплення кришки), які завжди залишаються у первозданному вигляді при візуалізації.

Складальна одиниця графічного пакету САТІА має розширення \*.CATProduct, проте через особливості використаної в програмі бібліотеки дану модель необхідно конвертувати в розширення \*.obj. Цю дію можна виконати за допомогою інших програмних засобів геометричного моделювання, таких як: Autodesk Maya, Autodesk 3ds Max та інших програм, які мають розширені можливості збереження та експорту файлів.

3ds Max (3D Studio Max) – повнофункціональна професійна програмна система для створення і редагування тривимірної графіки і анімації, розроблена компанією Autodesk [118]. Вона містить найсучасніші засоби для художників і фахівців в області мультимедіа і працює як в 32-бітових, так і в 64-бітових операційних системах Microsoft Windows і Windows NT.

3ds Max володіє величезними засобами зі створення різноманітних за формою та складністю тривимірних комп'ютерних моделей реальних чи фантастичних об'єктів навколишнього світу з використанням різноманітних технік і механізмів, які включають в себе такі:

- полігональне моделювання, в яке входять Editable mesh (редагована поверхня) і Editable poly (редагований полігон) – це найпоширеніший метод моделювання, що використовується для створення складних моделей та моделей для ігор;
- моделювання на основі неоднорідних раціональних В-сплайнів;

- моделювання на основі порцій поверхонь Безьє (Editable patch) – підходить для моделювання тіл обертання;
- моделювання з використанням вбудованих бібліотек стандартних параметричних об'єктів (примітивів) і модифікаторів.

Методи моделювання можуть поєднуватися один з одним. Моделювання на основі стандартних об'єктів, як правило, є основним методом моделювання і є початковою точкою для створення об'єктів складної структури, що пов'язано з використанням примітивів у поєднанні один з одним як елементарних частин складових об'єктів.

Незважаючи на всі переваги даної програми, механізми створення моделі багатоеlementного PBC досить складні, тому побудова геометричної моделі у програмному середовищі CATIA і її подальший імпорт у 3ds Max є раціональним кроком. На рис. 4.9 зображено головне вікно програми 3ds Max з імпортованою геометричною моделлю ОК.

Конвертація моделі у розширення \*.obj проходить наступним чином:

- імпортується повна складальна одиниця, яка включає в себе 27 елементів;
- зі складальної одиниці видаляються усі елементи окрім одного шляхом виділення імені необхідного елемента в дереві моделі та обрання команди «Delete» із контекстного меню;
- за допомогою команди «Export» з головного меню виконується збереження моделі у файл з розширенням \*.obj.

Дану процедуру необхідно повторити для кожного окремого елемента конструкції, оскільки тільки у такому випадку зберігається увесь набір координат місця розташування кожного елемента моделі у просторі. При завантаженні усіх елементів по одному будуть збережені координати «X» та «Y», а координата «Z» буде рівною 0.

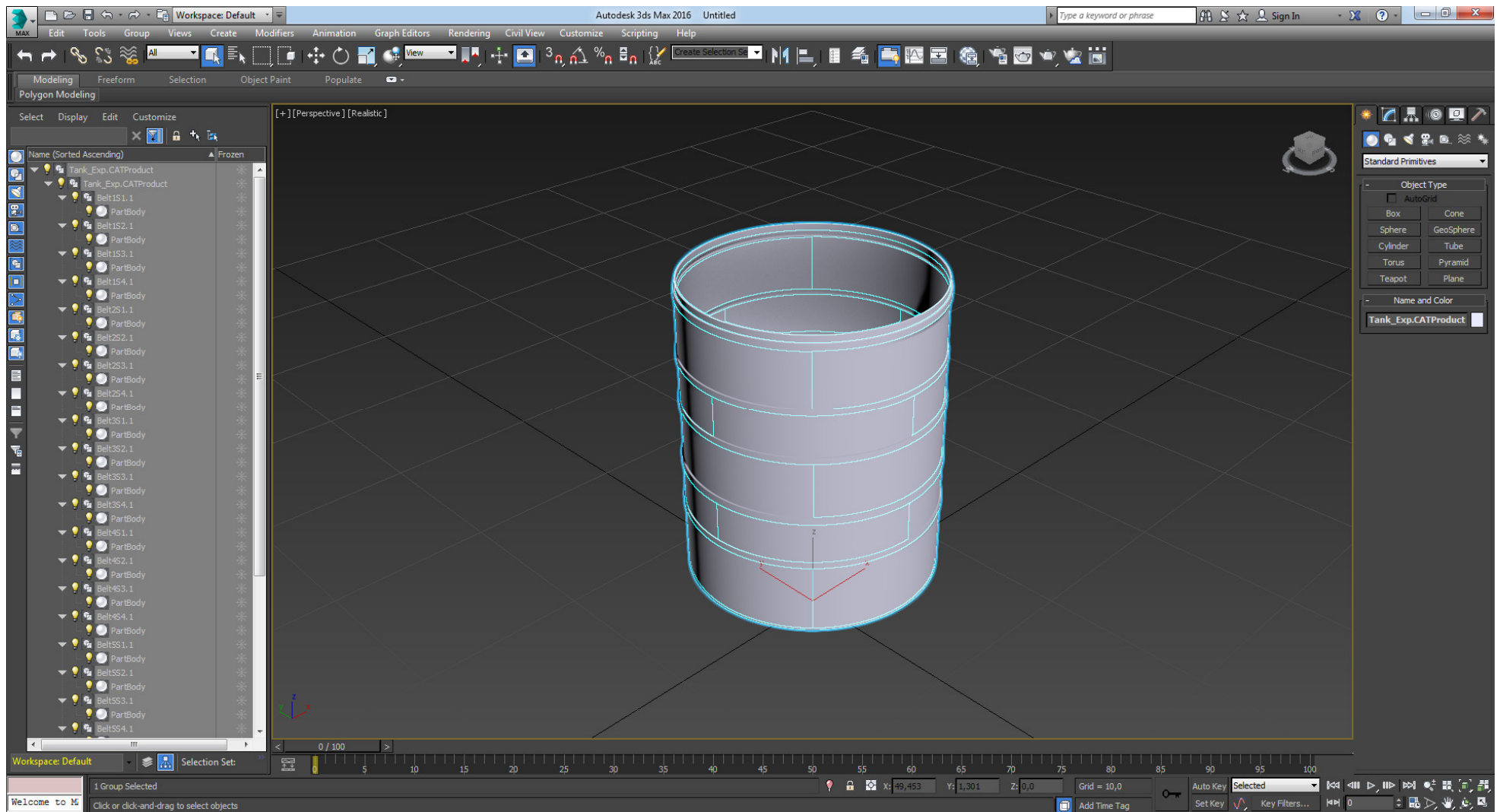


Рисунок 4.9 – Головне вікно програми 3ds Max з імпортованою геометричною моделлю



#### **4.5.4 Методика перевірки працездатності та результати роботи програми візуалізації на основі імітаційного моделювання**

Після того, як програмний код доповнений для підтримки усіх двадцяти семи елементів моделі та створені відповідні змінні, необхідно виконати налагодження програми, у результаті якого видаляються помилки та вносяться дрібні модифікації у код для покращення тих чи інших функцій.

Налаштування або перевірку працездатності програми можна провести шляхом використання заздалегідь відомих даних. У зв'язку з цим методика перевірки працездатності частини коду, що відповідає за візуалізацію тензометричних вимірювань, складається з наступних кроків:

1) Тестові дані згенеровано у математичному пакеті MATLAB як випадкові цілі числа від 0 до 50 умовних одиниць. Під умовною одиницею розуміється абстрактна величина, яка відповідає певному фіксованому рівню напружень.

2) Шкалу оцінки результату розбито для прикладу на 5 рівних проміжків, що відповідають певному стану геометричної моделі, який визначає її колір:

- а) 0-10 умовних одиниць. Безпечна експлуатація конструкції, напруження не перевищують допустимих значень, немає необхідності додаткового контролю відповідного сегменту. Відображення синім кольором;
- б) 11-20 умовних одиниць. Безпечна експлуатація конструкції, підвищені напруження, які все ще знаходяться у допустимих межах, немає необхідності додаткового контролю відповідного сегменту. Відображення зеленим кольором;
- в) 21-30 умовних одиниць. Підвищена небезпека експлуатації, напруження в незначній мірі перевищують допустимі значення, можливість появи залишкової деформації, виникає необхідність проведення додаткових заходів по зменшенню рівня напружень у межах відповідних сегментів. Відображення жовтим кольором;
- г) 31-40 умовних одиниць. Небезпечна експлуатація конструкції, напруження в значній мірі перевищують допустимі значення, у межах відпо-

відних областей виникає залишкова деформація, можливість швидкого розвитку та моментального розкриття тріщин, необхідність додаткового контролю інструментальними методами для локалізації зон концентрацій напружень в межах відповідних сегментів, проведення заходів щодо посилення конструкції та зменшення рівня напружень. Відображення помаранчевим кольором;

- д) 41-50 умовних одиниць. Аварійний стан, велика ймовірність моментального виходу з ладу відповідних сегментів через розкриття тріщин, руйнування зварних швів, тощо, необхідність повного виведення з експлуатації ОК та пошуку інструментальними методами зон концентрацій напружень в межах відповідних сегментів, проведення заходів щодо заміни окремих елементів, посилення конструкції та зменшення рівня напружень або повної утилізації об'єкта. Відображення червоним кольором.

3) При необхідності можна задати нові межі кожного проміжку (як і кількість проміжків) у залежності від розрахованих граничних значень вимірюваної величини.

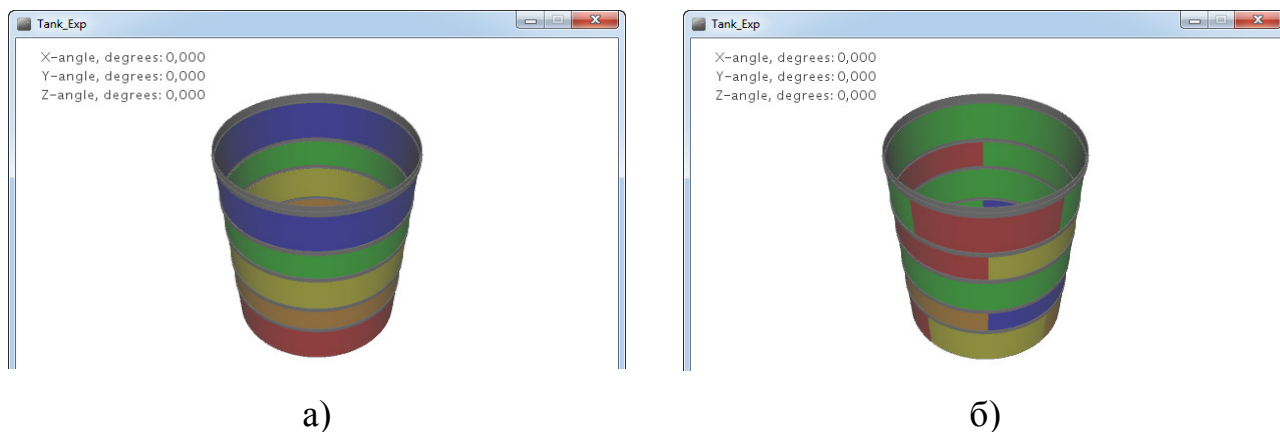
4) Для перевірки відповідності згенерованих даних результатам візуалізації тензометричних вимірювань розглянуто два випадки тестових даних:

- а) перевірка усіх проміжків однотипними даними (рис. 4.10,а), тобто вхідний файл з даними згенеровано таким чином, що в рамках кожного пояса ОК напруження в умовних одиницях не перевищують відповідних меж;
- б) перевірка усіх проміжків випадковими даними (рис. 4.10,б), тобто у файлі містяться випадкові величини напружень від 0 до 50 умовних одиниць для кожного елемента конструкції.

5) Пункт (4) повторити декілька разів для різної комбінації згенерованих вхідних даних.

У результаті налаштування частини коду для візуалізації результатів тензометричних вимірів недоліків не виявлено. Також у вікні програми додатково

було додано відображення шкали кольорів та відповідного рівня напружень для кожного проміжку. У залежності від реальних даних (кількості вимірювальних перетворювачів, місць їх розташування, величини напружень, розрахованих граничних значень, тощо) програмний код можна змінити або розширити для більш точної відповідності поставленим задачам.



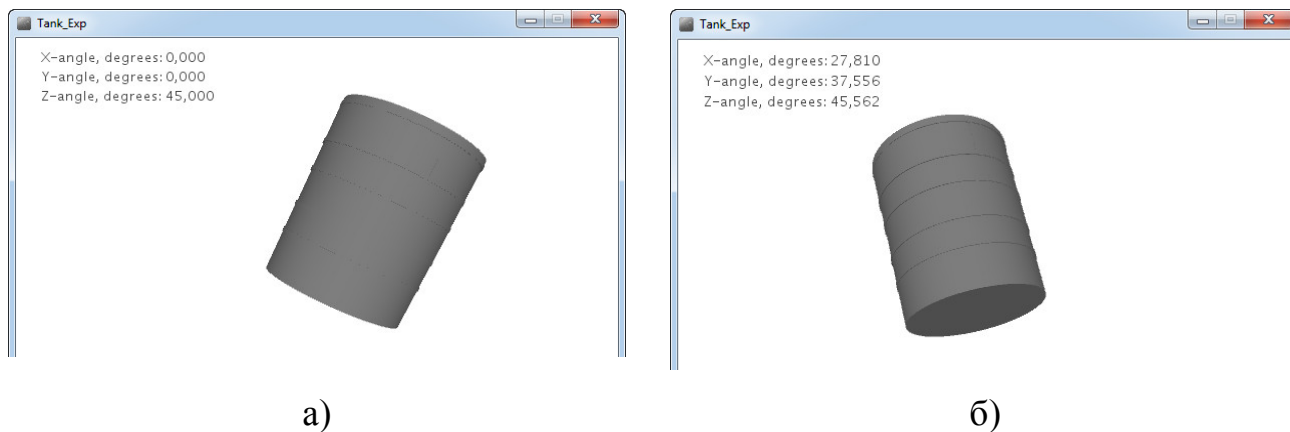
а) розподілені по окремим поясам проміжки; б) випадкові значення даних

Рисунок 4.10 – Результати візуалізації тензометричних даних

Методика перевірки працездатності частини коду, що відповідає за візуалізацію інклінометричних вимірювань складається з наступних кроків:

- 1) Для перевірки відповідності згенерованих даних результатам візуалізації кутового положення розглянуто два випадки тестових даних:
  - а) перевірка кутового переміщення по кожній осі окремо (рис. 4.11,а), тобто вхідний файл з даними згенеровано таким чином, що в рамках однієї візуалізації він містить кути нахилу ОК тільки по одній осі;
  - б) перевірка кутового переміщення за трьома осями одночасно (рис. 4.11,б), тобто у файлі містяться випадкові величини кутів нахилу ОК по усім осям в рамках однієї візуалізації.
- 2) Пункт (1) повторити декілька разів для різної комбінації згенерованих вхідних даних.

Остаточний вигляд головного вікна зображено на рис. 4.12.



а) по одній осі; б) по трьом осям одночасно

Рисунок 4.11 – Перевірка кутового переміщення геометричної моделі

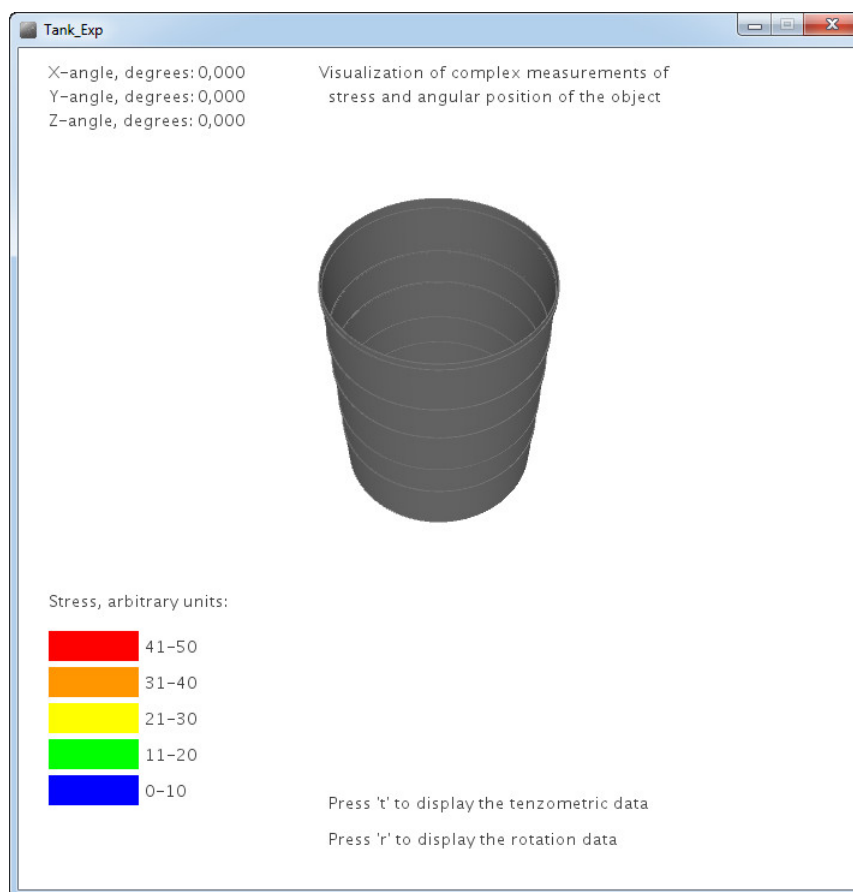


Рисунок 4.12 – Головне вікно програми

У результаті налагодження частини коду, що відповідає за візуалізацію кутового положення, у текст програми було додано код, що очищує змінні кутових переміщень по кожній осі при повторному натисканні клавіші «r» та після відо-

браження останніх значень з файлу, які до цього залишалися в змінних і могли призвести до некоректної візуалізації.

Загалом розроблена програма візуалізації даних комплексних вимірювань напружень та кутового положення об'єктів працює без збоїв і може бути рекомендованою (після корегування значень деяких змінних для реальних даних вимірів) для тестування та використання у діагностичній апаратурі, зокрема СРП. Розроблене програмне забезпечення доцільно використовувати (з необхідними розширеннями) для безперервної он-лайн візуалізації даних вимірів безпосередньо з вимірювальних перетворювачів.

#### **4.6 Перевірка адекватності імітаційної моделі**

Важливим етапом у процесі створення імітаційної моделі є її верифікація та валідація – оцінка адекватності, тобто перевірка на відповідність об'єкту контролю в рамках розглянутих умов. Зазвичай така перевірка здійснюється при відомій реакції конструкції на конкретний вхідний вплив або з використанням не трудомістких аналітичних методів і зіставляється з результатами імітаційного моделювання. Якщо модель не адекватна, то вона виправляється до прийняттого стану, при якому можна судити про коректність висновків про стан реального об'єкта.

За допомогою імітаційного моделювання після отримання адекватної моделі ОК можна не тільки оцінити його поточне, але й спрогнозувати ситуації поліпшення/погіршення ТС шляхом варіювання вхідних даних і повторення експерименту для формування набору правил і критеріїв по кожному діагностичному параметру.

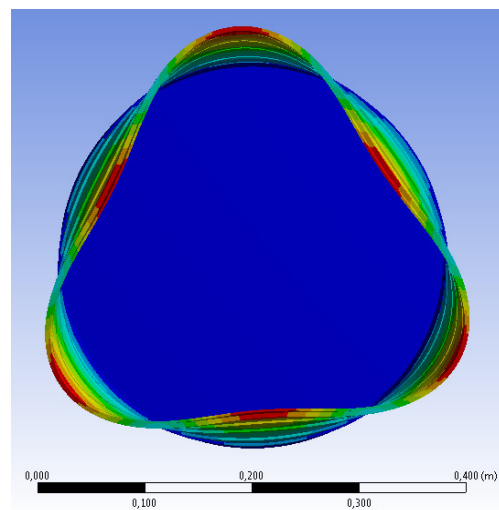
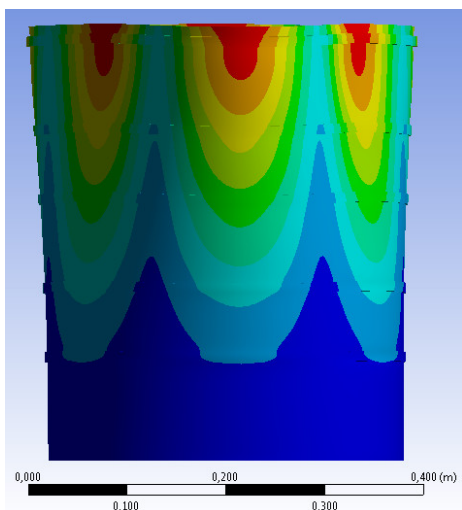
Власні форми та частоти коливань є інтегральними характеристиками пружно-інерційних властивостей об'єктів. Тому для перевірки адекватності розробленої імітаційної моделі порівнюємо модальні характеристики імітаційної та фізичної моделей ОК у відповідності до розробленої методики:

1. Шляхом імітаційного моделювання визначити перші 20 форм коливань і відповідні частоти ОК.
2. Провести експериментальні дослідження фізичної моделі ОК за методом вільних коливань:
  - 2.1. на двох поясах обрати по чотири вимірювальних точки;
  - 2.2. блок датчиків закріпити на одній з точок;
  - 2.3. шляхом імпульсної дії уздовж осі чутливості та перпендикулярно їй викликати вільні коливання резервуара;
  - 2.4. пункт 2.3 повторити 10 разів для забезпечення повноти аналізу;
  - 2.5. блок датчиків перемістити на іншу точку і повторити пункти 2.2-2.4;
  - 2.6. результати аналізуються методами спектральної обробки сигналів для визначення власних частот;
  - 2.7. пункти 2.2-2.6 повторити необхідну кількість разів (у залежності від кількості поясів об'єкта досліджень).
3. Провести порівняльний аналіз власних частот, отриманих шляхом імітаційного та фізичного моделювань.

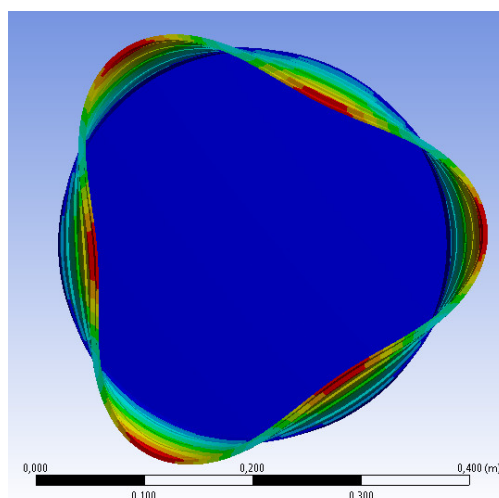
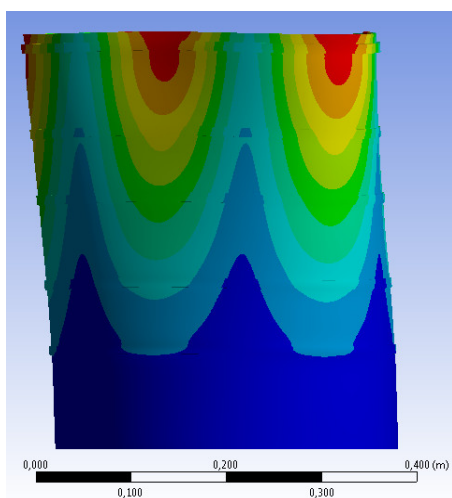
#### **4.6.1 Результати імітаційного моделювання**

Для модального аналізу розроблено скінчено-елементну модель, що складається з 480 000 елементів. У результаті моделювання визначено перші 20 форм (мод) і частот коливань. Приклади вільних коливань імітаційної моделі ОК наведено на рис. 4.12-4.17 (зліва – вигляд збоку, справа – вигляд зверху). Як видно з наведених рисунків, вільні коливання моделі є складними коливаннями у просторі і характеризуються великою кількістю вузлів і пучностей.

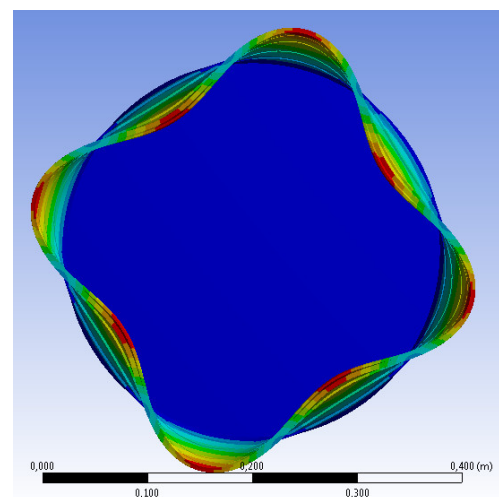
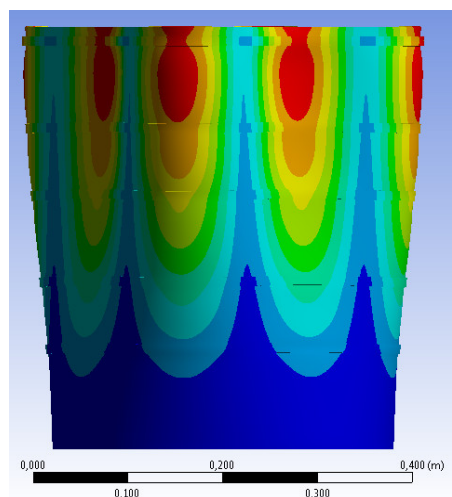
Визначені у процесі модального аналізу частоти власних коливань для відповідних мод наведено в табл. 4.1. Як видно, кожній частоті відповідають дві форми коливань, які відрізняються одна від одної кутом повороту навколо вертикальної осі (наприклад, якщо порівняти рис. 4.16,а та рис 4.16,б).



а)

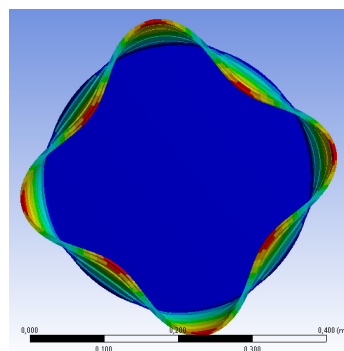
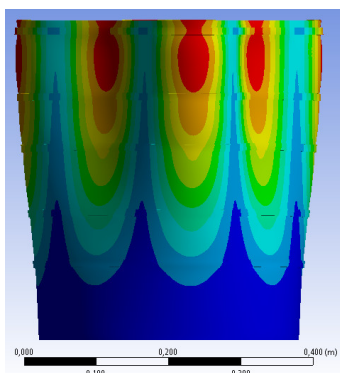


б)

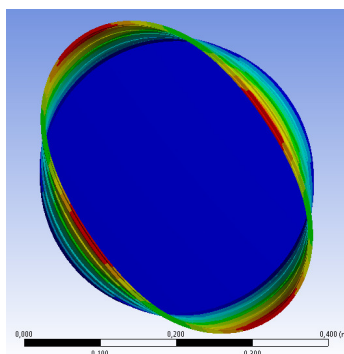
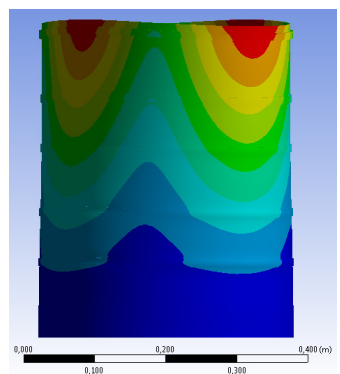


в)

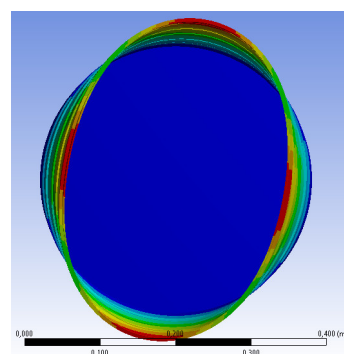
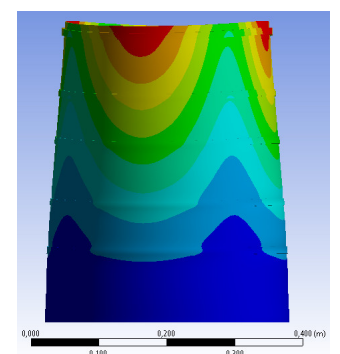
Рисунок 4.12 – Приклад вільних коливань моделі ОК по: а) першій моді; б) другій моді; в) третій моді



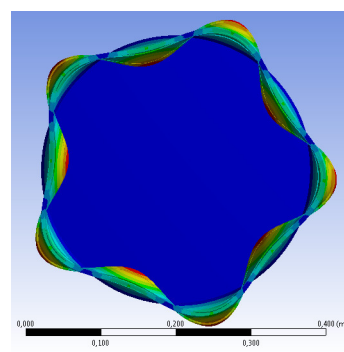
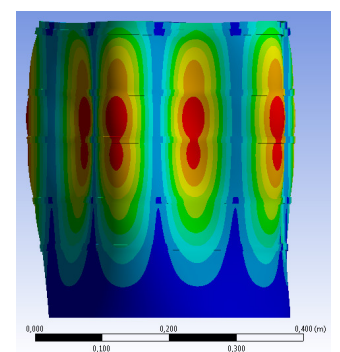
а)



б)



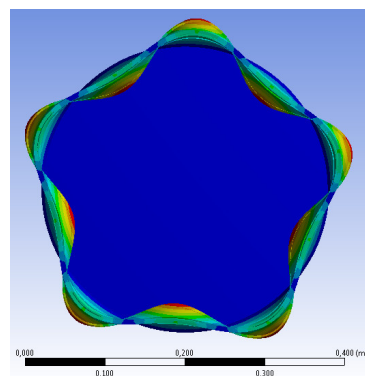
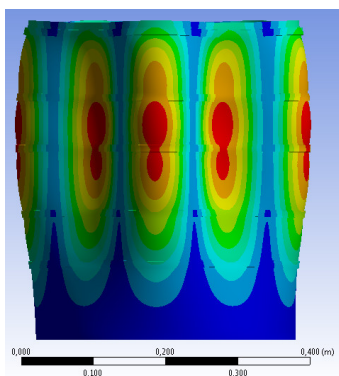
в)



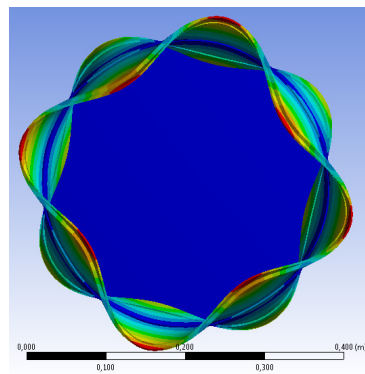
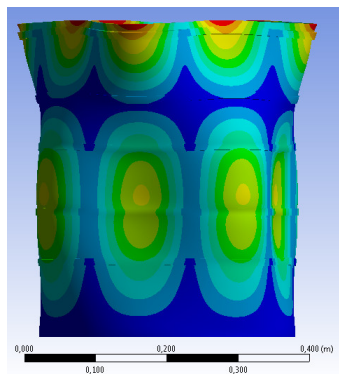
г)

Рисунок 4.13 – Приклад вільних коливань моделі ОК по: а) четвертій моді; б) п'ятій моді; в) шостій моді; г) сьомій моді

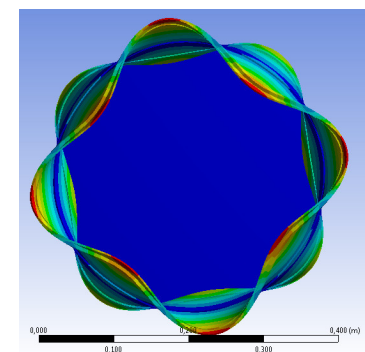
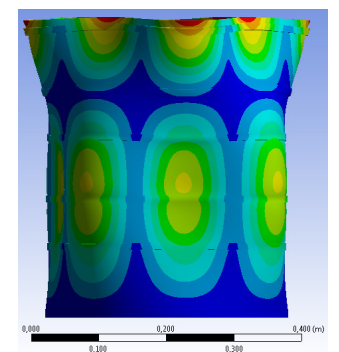




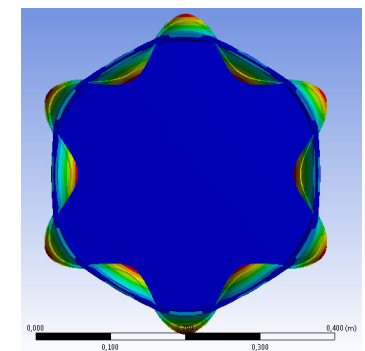
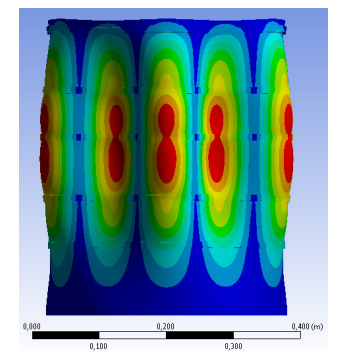
а)



б)

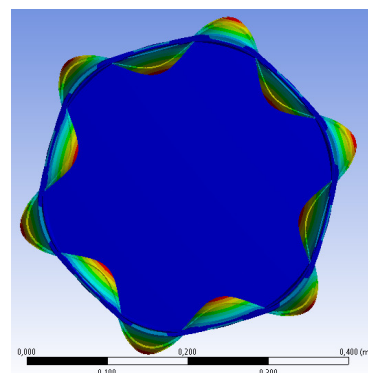
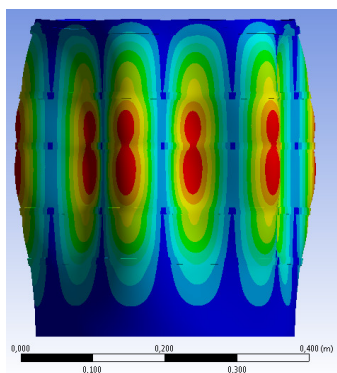


в)

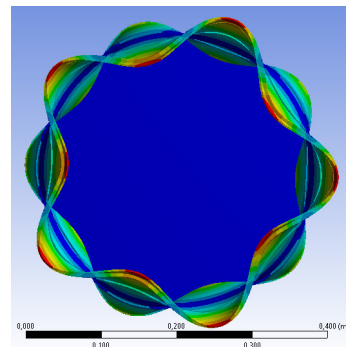
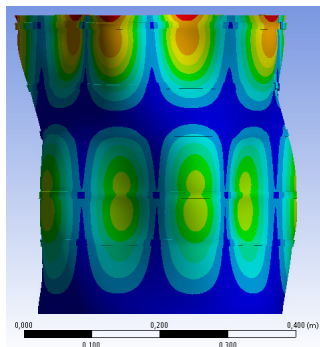


г)

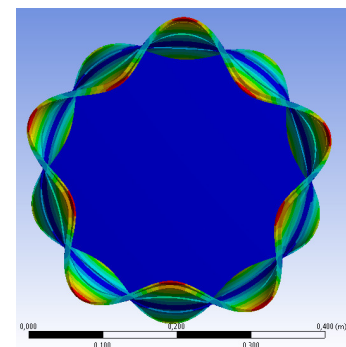
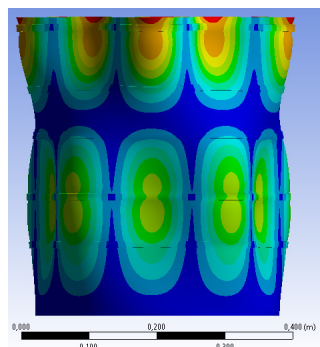
Рисунок 4.14 – Приклад вільних коливань моделі ОК по: а) восьмій моді; б) дев'ятій моді; в) десятій моді; г) одинадцятій моді



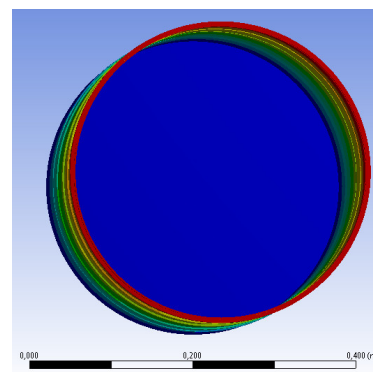
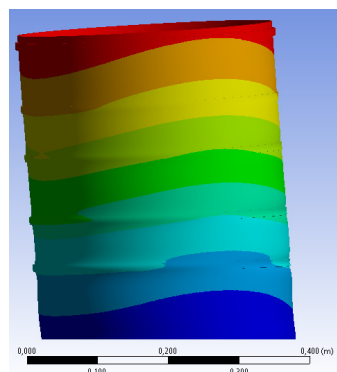
а)



б)

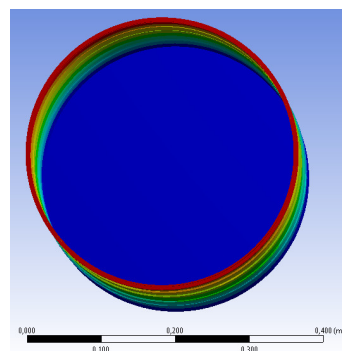
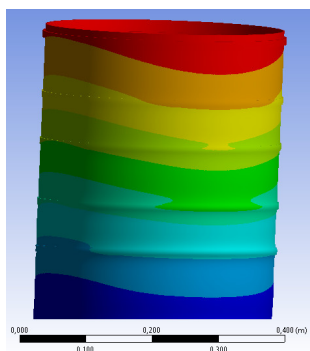


в)

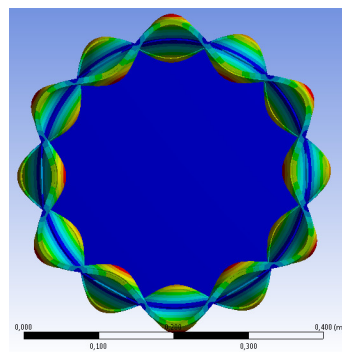
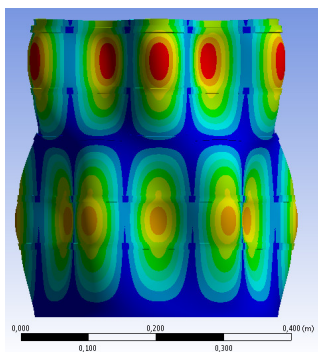


г)

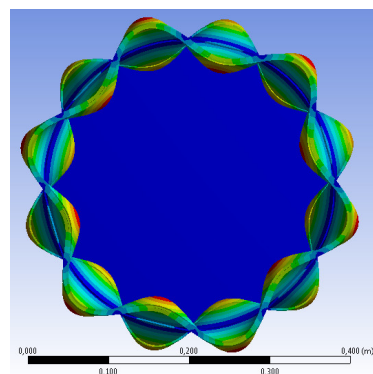
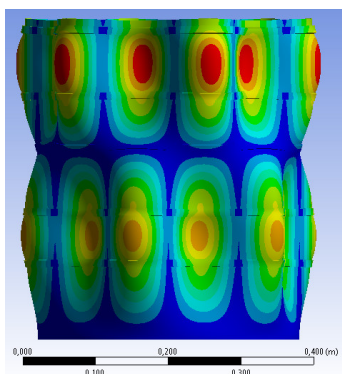
Рисунок 4.15 – Приклад вільних коливань моделі ОК по: а) дванадцятій моді; б) тринадцятій моді; в) чотирнадцятій моді; г) п'ятнадцятій моді



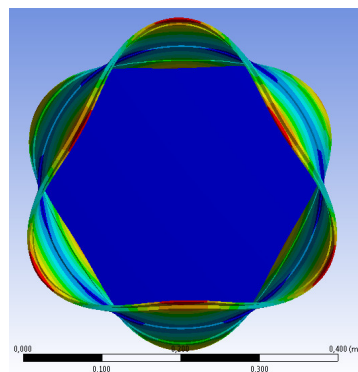
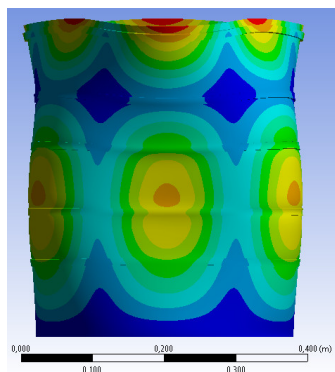
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.16 – Приклад вільних коливань моделі ОК по: а) шістнадцятій моді; б) сімнадцятій моді; в) вісімнадцятій моді; г) дев'ятнадцятій моді

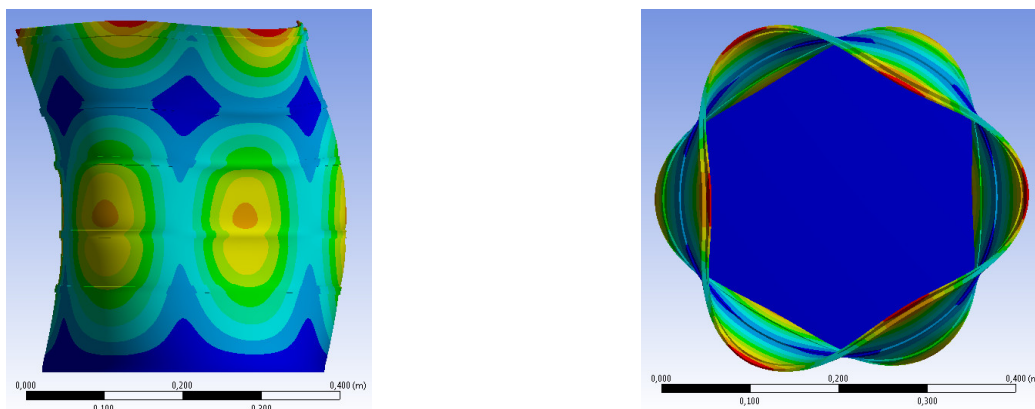


Рисунок 4.17 – Приклад вільних коливань моделі ОК по двадцятій моді

Таблиця 4.1 – Результати модального аналізу в програмному комплексі ANSYS

Мода	Частота, Гц	Мода	Частота, Гц	Мода	Частота, Гц	Мода	Частота, Гц
1	303,81	6	414,43	11	745,63	16	909,03
2	303,81	7	559,43	12	745,64	17	931,02
3	407,62	8	559,44	13	780,91	18	931,04
4	407,62	9	742,77	14	780,93	19	965,38
5	414,4	10	742,83	15	908,99	20	965,42

Резервуар є складним інженерно-технічним об'єктом, а саме: просторовою оболонковою конструкцією. Саме тому кожній частоті (при округленні до цілих чисел) відповідають дві моди коливань (табл. 4.1 та рис. 4.12-рис. 4.17), форма яких співпадає, а відрізняється лише кут повороту навколо вертикальної осі. У разі виникнення механічного резонансу вищевказаний факт може призвести до випадкового характеру руйнування матеріалів конструкції.

#### 4.6.2 Результати фізичного моделювання

Відповідно до розробленої методики необхідно провести експериментальні дослідження фізичної моделі ОК за методом вільних коливань. Для рішення цієї

задачі використано макет каналу вимірювання вібрації, структуру якого зображено на рис. 4.18.



О – об'єкт контролю; БА – блок акселерометрів; АЦП – аналогово-цифровий перетворювач; БО – блок обробки (персональний комп'ютер)

Рисунок 4.18 – Узагальнена структурна схема каналу вимірювання вібрації

Блок акселерометрів (рис. 4.19) складається з двох закріплених на платі мікромеханічних датчиків MS8002.D фірми Colibrys (діапазон вимірювань  $\pm 2g$ ). Плати з датчиками розміщені на корпусі так, що вимірювальні осі акселерометрів є ортогональними. Під дією прискорення інерційна маса датчика зміщується щодо положення своєї рівноваги, це зміщення перетворюється на відповідний електричний сигнал і передається на 14-розрядний АЦП m-DAQ-14, за допомогою якого вхідні аналогові сигнали перетворюються в дискретний код і передаються на блок обробки. Головне завдання вібраційного каналу полягає у визначенні та контролі вібраційних характеристик ОК. Приклад сигналу, виміряного за допомогою макету, зображено на рис. 4. 20.

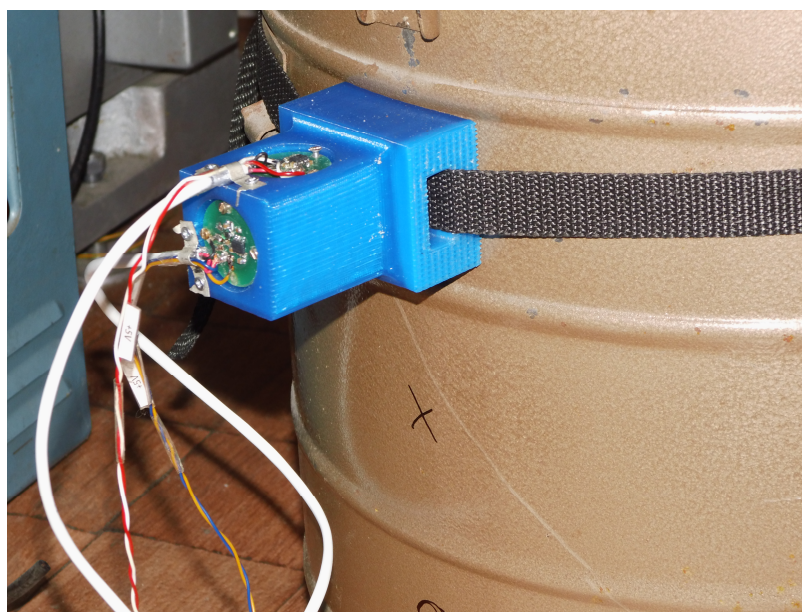


Рисунок 4.19 – Блок акселерометрів, установлений на фізичній моделі резервуара



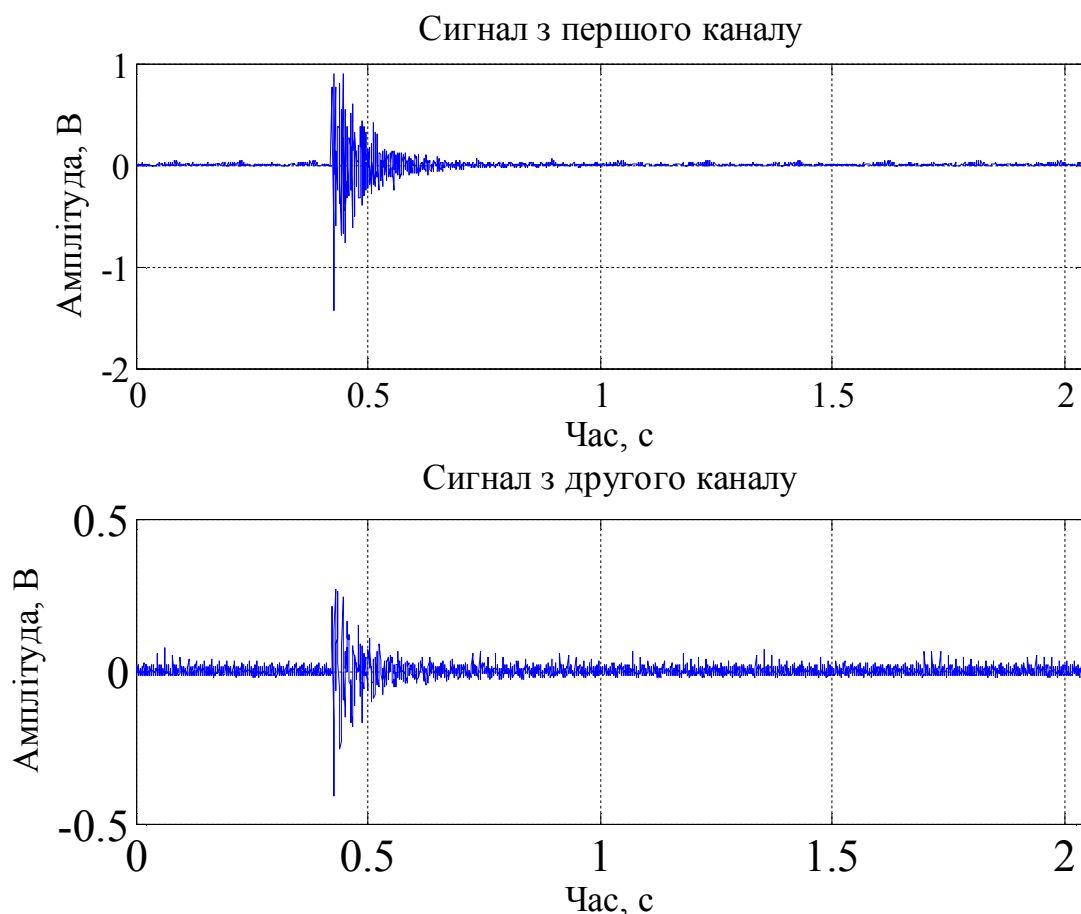


Рисунок 4.20 – Приклад вимірюваного імпульсного відгуку ОК

Програма обробки отриманих у ході досліджень сигналів реалізована в математичному пакеті MATLAB і виконує наступні функції:

- завантаження збережених на персональний комп'ютер сигналів;
- формування вектора даних по кожному окремому каналу;
- корекція значень вектора даних з урахуванням розрядності АЦП і його вхідного діапазону відповідно до особливостей запису сигналів в файл;
- проведення спектрального аналізу із застосуванням методу Уелча і спектрограм;
- виведення отриманих графіків на пристрій графічного відображення.

Для оцінки впливу шумів АЦП на результати вимірювань було проведено запис сигналів без підключення блоку акселерометрів. Часова реалізація шумів АЦП і результат їх спектральної обробки представлені на рис. 4.21. Спектраль-

ний аналіз показав, що максимальний рівень шуму досягає -84 дБ на частоті 6 Гц, а середній рівень шумів АЦП становить -98 дБ.

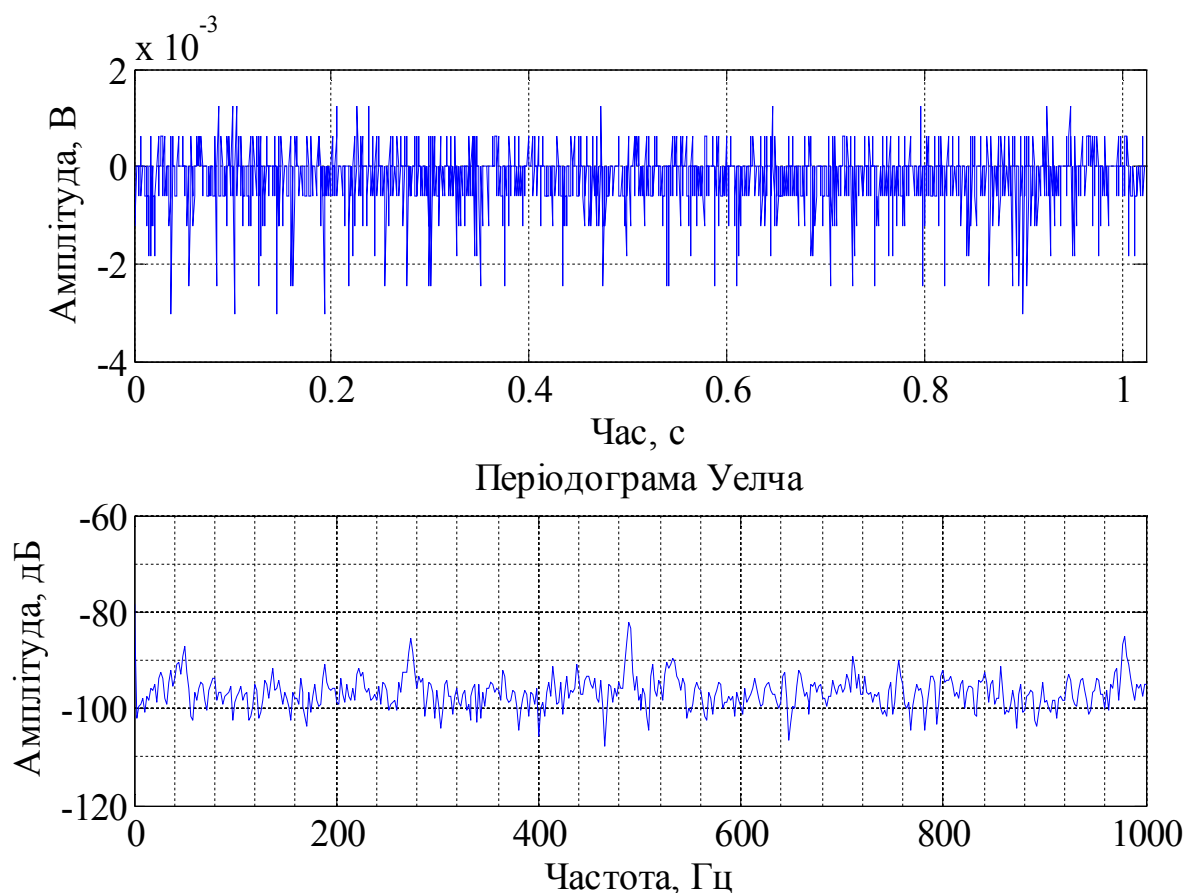


Рисунок 4.21 – Шуми АЦП у часовій та частотній областях

На підставі аналізу сигналів шуму АЦП в програму обробки вібраційних сигналів внесено додатковий модуль попередньої обробки, що виконує обчислення середнього значення вимірювального шуму по перших 512 точкам сигналу до збудження вільних коливань в об'єкті з подальшим його вирахуванням з корисного сигналу для виключення зі спектрів складової на нульовій частоті. Ця фільтрація є необхідною для врахування відхилення блоку акселерометрів від вертикальної і горизонтальної площин при його закріпленні на ОК.

На рис. 4.22 зображено спектр сигналу вібрації, отриманого при імпульсному збудженні коливань уздовж осі чутливості акселерометра, що знаходиться в горизонтальній площині (перший канал). Вісь чутливості другого акселеромет-

ра (другий канал) розташована в ортогональній площині і спрямована вертикально вгору.

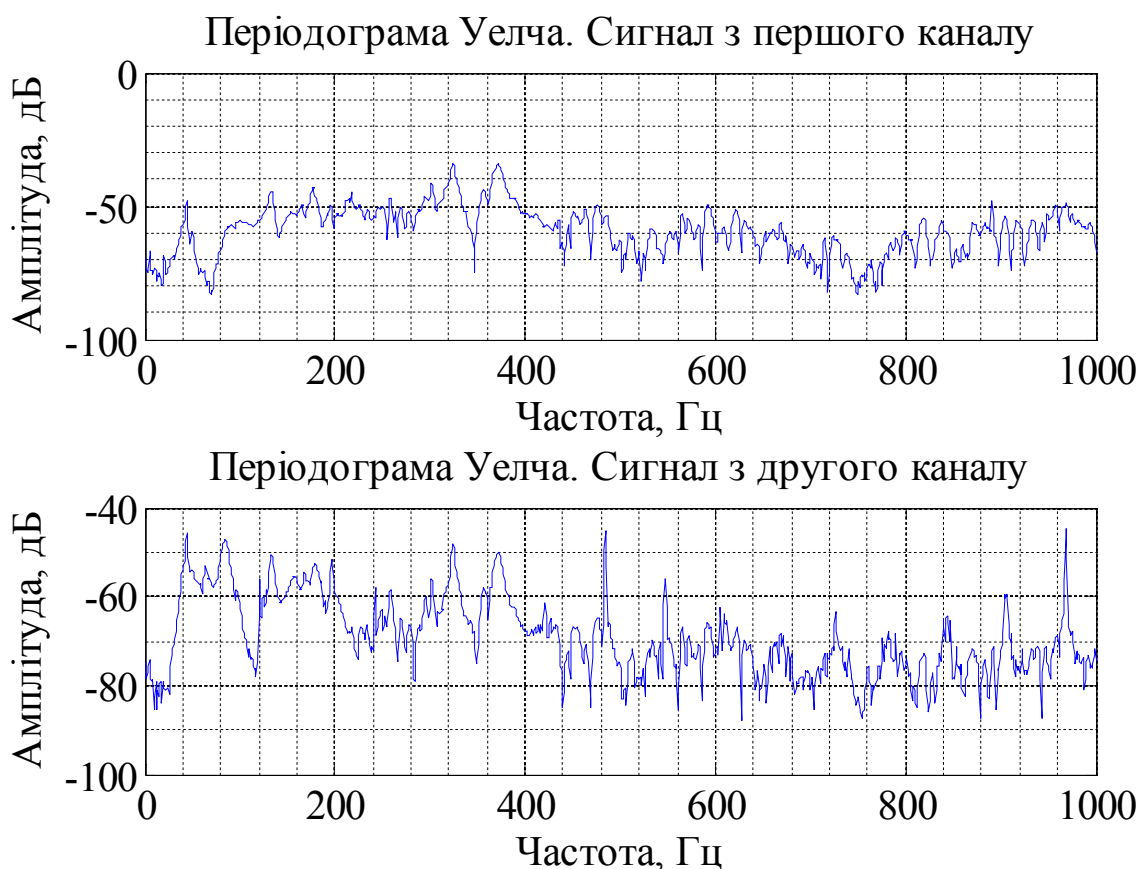


Рисунок 4.22 – Періодограма Уелча вібраційного відгуку при ударі уздовж осі чутливості акселерометра

Аналізуючи рис. 4.21 та рис. 4.22 можна зробити висновок про відсутність впливу шумів АЦП на сигнали вібрації у зв'язку з відмінністю їх рівнів більше ніж на 20 дБ. Також з рис. 4.22 видно, що по першому каналу присутні частоти 44 Гц, 133 Гц, 177 Гц, 301 Гц, 324 Гц та 372 Гц, а по другому – 44 Гц, 85 Гц, 324 Гц, 372 Гц, 484 Гц, 548 Гц, 906 Гц та 970 Гц.

На відміну від амплітудно-частотного частотно-часовий аналіз результатів вимірювань дозволяє визначити не тільки частоту коливань ОК, але й момент часу, у який вона виникла. На рис. 4.23 наведено спектрограму розглянутого вище



сигналу вібрації. Амплітуда частотного піку визначається кольором, де темно-червоний відповідає максимумам, синій – мінімумам амплітуди.

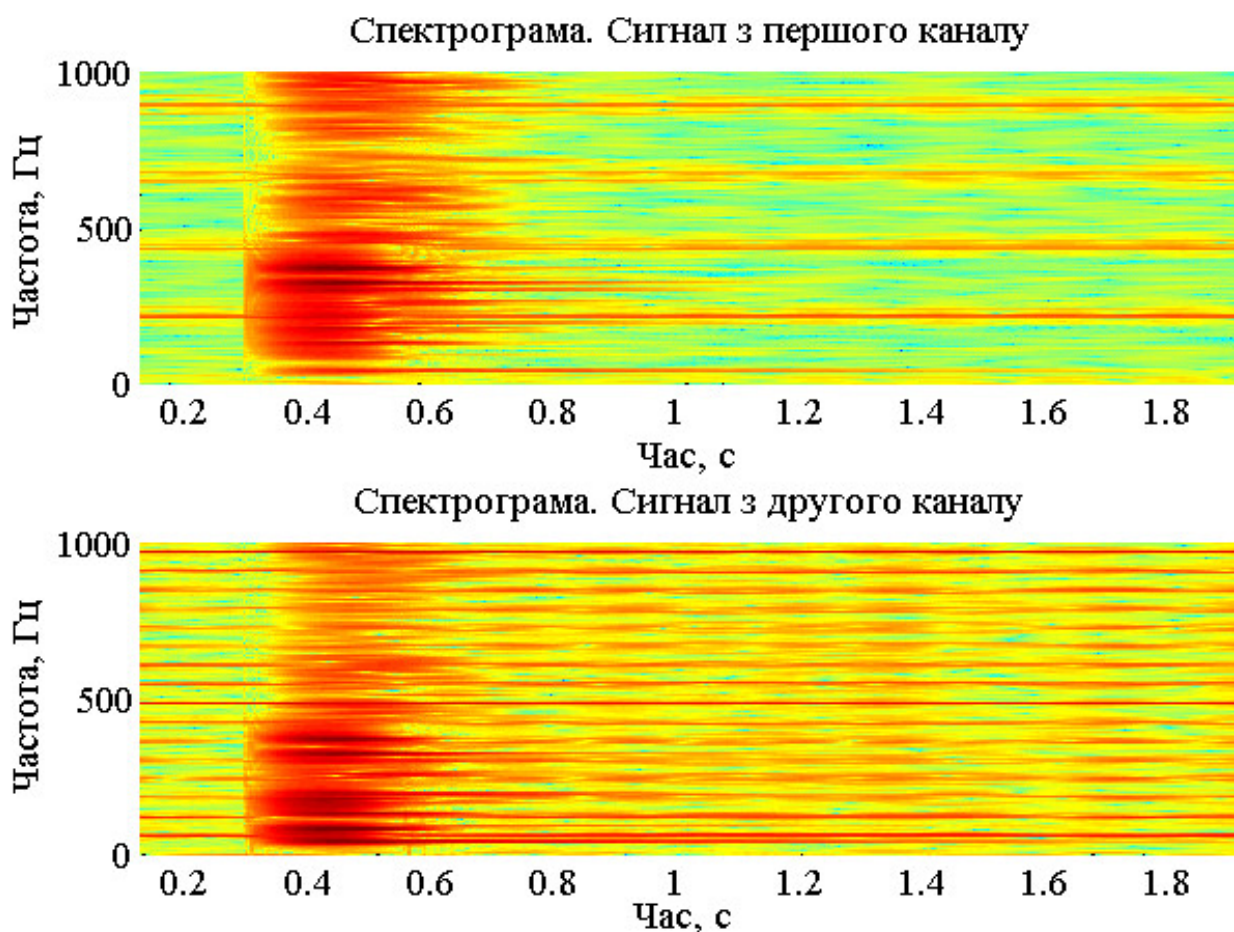


Рисунок 4.23 – Спектрограма вібраційного відгуку при ударі уздовж осі чутливості акселерометра

Як видно, у сигналі є частоти, що присутні як до моменту імпульсного збудження, так і після затухання вібраційного відгуку, а саме: 217 Гц, 434 Гц, 650 Гц, 677 Гц та 893 Гц по першому каналу, 65 Гц, 123 Гц, 185 Гц, 245 Гц, 303 Гц, 365 Гц, 424 Гц, 484 Гц, 548 Гц, 607 Гц, 670 Гц, 733 Гц, 787 Гц, 847 Гц, 906 Гц та 970 Гц – по другому. Так як дані частоти не є реакцією конструкції на імпульсне збудження, виключаємо їх з подальшого аналізу. Таким чином частотний склад сигналу, отриманий по першому каналу не змінився, а по другому каналу залишилися частоти 44 Гц, 85 Гц, 324 Гц, 372 Гц.

Порівняльний аналіз отриманих результатів скінчено-елементного моделювання та обробки сигналів вібрації показали, що ОК здійснює в горизонтальній площині коливання по першим двом модам незалежно від обраного напрямку імпульсного впливу. Також на спектрі присутні інші частоти, які з деякою мірою вірогідності можуть відповідати коливанням по 3-6 формам. Присутність у спектрі інших частот пояснюється наявністю неврахованих у скінчено-елементній моделі елементів конструкції та недосконалістю вхідного (імпульсного) впливу.

Значення абсолютної і відносної похибок визначення частот власних коливань за першою формою експериментальним шляхом і чисельними методами знаходяться в допустимих межах і становлять відповідно 20,4 Гц і 6,3 %. Отже, адекватність імітаційної моделі складає понад 90 %, що можна вважати достатнім для практичного використання в СРП.

#### 4.7 Візуалізація даних прогнозу росту рівня деформації

Розроблена підсистема візуалізації дозволяє використовувати інформацію, отриману з блоку прогнозу розробленої СРП, для прогнозування росту рівня деформації й виведення відповідних графіків у вигляді екстрапольованих ліній тренду.

Під трендом будемо розуміти функціональну залежність вимірюваної величини від часу з практично відсутніми випадковими впливами [119]. При розробці моделей прогнозування тренд являється основною складовою прогнозованого часового ряду, на яку вже накладаються інші, у тому числі випадкові, складові. Результат при цьому є виключно дискретною функцією часу, тобто:

$$\hat{y}_k = f(t_k),$$

де  $\hat{y}_k$  – дискретне значення моделі тренду при  $k=1, 2, \dots, n$ ;  $t$  – час.

Модель тренду може виражатися за допомогою багатьох функцій, на основі яких формується модель прогнозу й відбувається її оцінка [120]. Для вирішен-

ня завдання прогнозування результатів вимірювань у наш час широко використовуються математико-статистичні методи визначення моделі тренду на основі методу найменших квадратів, адаптивних методів, авторегресивних методів, тощо. Ці методи вимагають апріорної інформації про функцію тренда для коректного вибору ступеня полінома апроксимації. У тих випадках коли такої інформації немає, застосовуються евристичні прийоми, які засновані не на ймовірнісно-статистичній теорії [121], наприклад, метод ковзних середніх або метод експоненціального згладжування.

На практиці найбільше поширення одержали наступні види моделей тренду [120]:

1. Лінійна:  $\hat{y}_k = a_0 + a_1 t_k$ .
2. Параболічна:
  - другого порядку  $\hat{y}_k = a_0 + a_1 t_k + a_2 t_k^2$ ;
  - третього порядку  $\hat{y}_k = a_0 + a_1 t_k + a_2 t_k^2 + a_3 t_k^3$
  - функції більш високих порядків.
3. Степенева:  $\hat{y}_k = a_0 + a_1 \cdot t_k^{a_2}$  або  $\hat{y}_k = a_0 + a_1 \cdot t_k^{-a_2}$ .
4. Показникова:  $\hat{y}_k = a_0 \cdot a_1^{t_k}$  або  $\hat{y}_k = a_0 \cdot e^{a_1 t_k}$ .
5. Логарифмічна:  $\hat{y}_k = a_0 + a_1 \cdot \lg t_k$ .

Таким чином, найбільш поширеним методом прогнозування [120] виступає аналітичний вираз тренда у вигляді функціональної залежності вимірюваної величини від часу. Екстраполяція дискретної функції (моделі), якою описується тренд, дає змогу отримати точкове значення прогнозу зміни рівня деформацій на зазначений період часу. При цьому припускається, що зміна рівня напружено-деформованого стану конструкції, зокрема накопичення пластичних деформацій, формується під впливом декількох факторів, який неможливо виділити окремо для кожного з них.

На відміну від інших вимірюваних величин (вібрація, кути нахилу, тощо) побудова трендової моделі рівня деформацій відбувається за наступною методикою:

1. Проведення вимірювань рівня деформацій протягом заздалегідь визначеного проміжку часу, наприклад, 1 годину на добу.
2. Визначення математичного сподівання для вимірних даних.
3. Побудова точки, яка відповідає визначеному у пункті (2) математичному сподіванню, на графіку.
4. Визначення моделі тренду.
5. Відображення прогнозних значень (екстраполяція тренду).

Побудова тренду на основі визначення математичного сподівання пояснюється його зміною при появі та накопиченні пластичних деформацій у конструкції, які призводять до незворотних (у більшості випадків) змін геометрії об'єкта відносно його початкового стану.

Для візуалізації прогнозу зміни рівня деформацій у математичному пакеті MATLAB було реалізовано програму екстраполяції тренду на основі наведеної вище методики та алгоритмом, який відповідає алгоритму програми візуалізації даних вібраційних вимірювань (рис. 4.4). Визначення моделі тренду відбувається за допомогою методу найменших квадратів з використанням параболічних моделей до третього порядку включно [121].

За допомогою розробленої програми для математичної моделі результатів вимірювань [121]

$$y_k = S_k + \varepsilon_k,$$

де  $S_k$  – корисний сигнал;  $\varepsilon_k$  – адитивна випадкова складова, що розподілена за гаусівським законом,

проведено екстраполяцію (прогнозування) зміни рівня деформацій на 31 значення в майбутнє.

Моделі сигналів вимірювань обрані таким чином, що перших 40 вимірювань характеризують бездефектний стан конструкції, тобто всі деформації є пружними і  $S_k = S_{k1} = const$ . Усі наступні вимірювання містять пластичну деформацію, що зростає за лінійним законом

$$S_k = S_{k2} = S_{k1} + a \cdot t,$$

де  $a$  – константа;  $t$  – час, с.

Як відомо, через дві точки можна провести тільки одну пряму, тобто апроксимуючи результати двох вимірювань отримаємо лінійну залежність з достовірністю апроксимації  $R^2 = 1$ . На рис. 4.23 зображено прогнозну криву за результатами трьох вимірювань рівня деформацій. Як видно з рисунка, апроксимація являє собою параболічну функцію другого порядку, а достовірність апроксимації складає  $R^2 = 1$ .

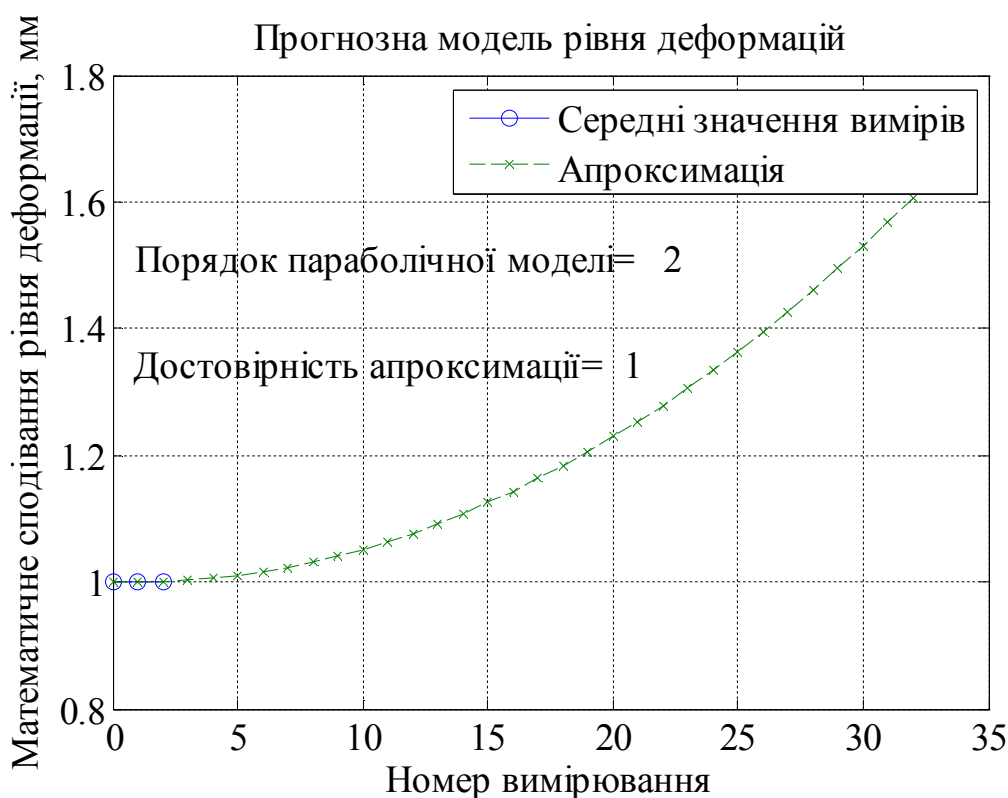


Рисунок 4.23 – Приклад екстраполяції тренду при наявності результатів 3 вимірювань рівня деформацій

При наявності 15 результатів вимірювань (рис. 4.24) точність апроксимації знижується  $R^2 = 0,33$  за рахунок наявності у сигналі окрім корисної складової також шуму, але майже в два рази збільшується точність прогнозу: з 1.7 мм до 0.998 мм.

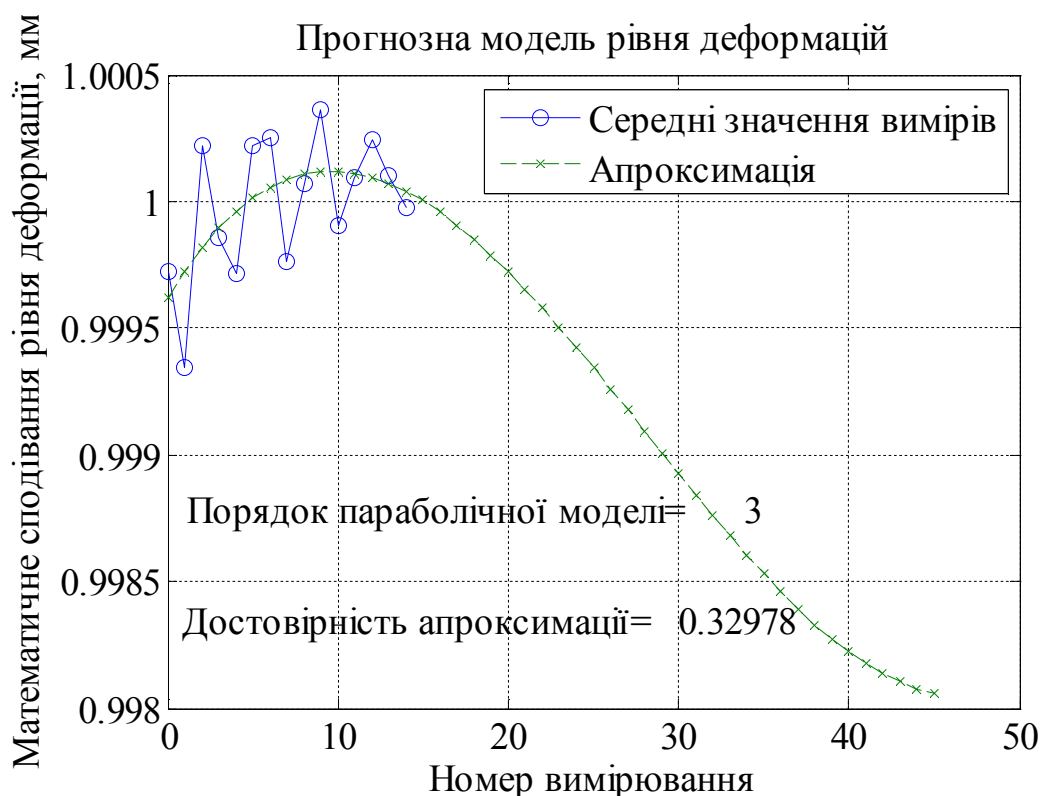


Рисунок 4.24 – Приклад екстраполяції тренду при наявності результатів 15 вимірювань рівня деформацій

Збільшенні кількості вимірювань до 31 (рис. 4.25) призводить до зменшення достовірності апроксимації за рахунок збільшення кількості випадкових складових. Поява вираженої закономірності у вимірюваннях (рис. 4.25), що зумовлена пластичною деформацією, призводить до значного підвищення достовірності апроксимації. Визначено, що для розглянутої моделі сигналів задовільна достовірність апроксимації параболоїдами другого і більш високих порядків досягається тільки при наявності вираженої закономірності у результатах вимірювань.

Таким чином, точна оцінка прогнозу носить умовний характер, тому що [120]:

- обрана модель тренду дає лише наближену оцінку, так як вона не є єдиною можливою;
- статистичне прогнозування здійснюється на основі обмеженого обсягу інформації;

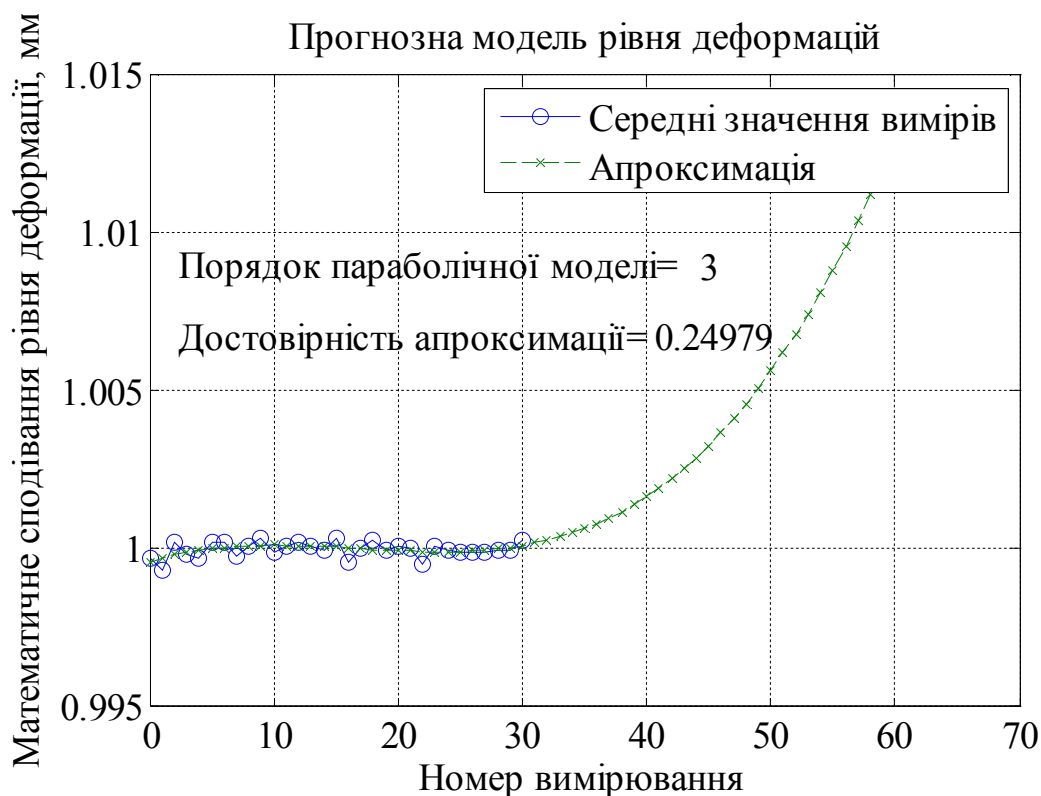


Рисунок 4.25 – Приклад екстраполяції тренду при наявності результатів 31 вимірювання рівня деформацій

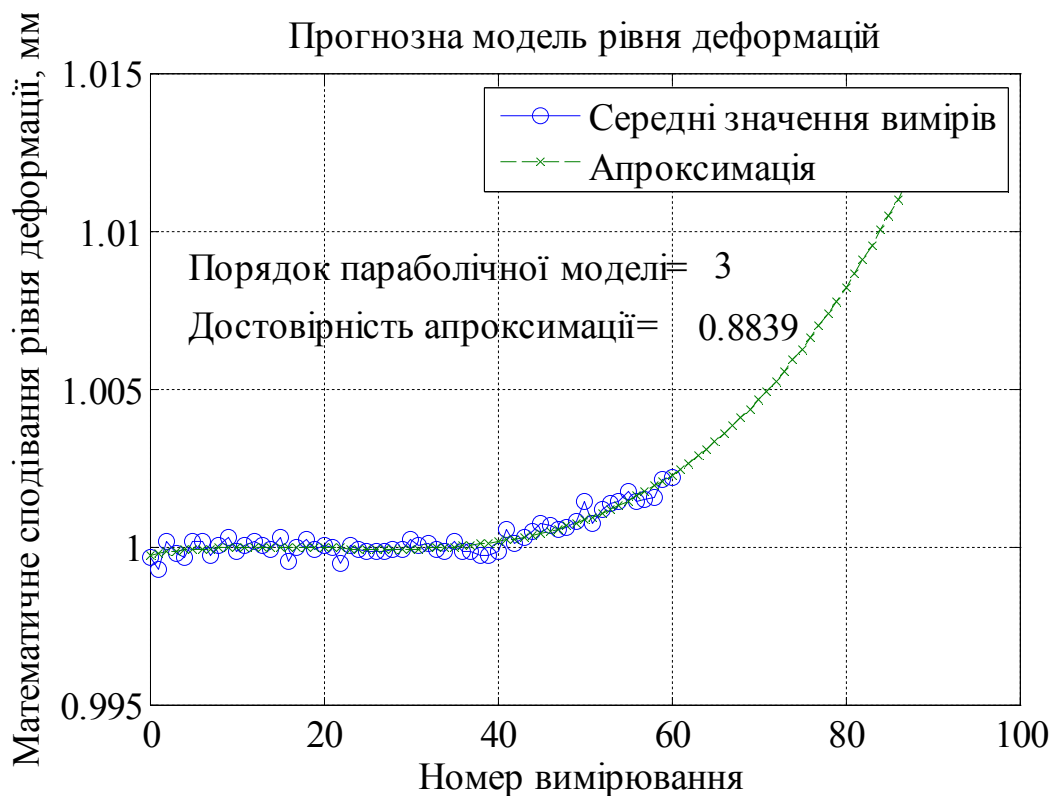


Рисунок 4.26 – Приклад екстраполяції тренду при наявності результатів 61 вимірювання рівня деформацій

- наявність у вихідному сигналі випадкового компонента призводить до значного зниження точності прогнозу.

При невеликій кількості вихідних даних з випадковими складовими у вигляді шуму для підвищення точності апроксимації (прогнозування) можна використовувати, наприклад, поліноми більш високих порядків, графіки яких мають більш складну форму. Недоліком такого підходу є можливість прогнозування лише декількох майбутніх значень.

У окремих випадках підвищити точність прогнозу, у тому числі при наявності випадкових складових у сигналах, можна за рахунок збільшення кількості вимірювань: кожне нове значення математичного сподівання рівня деформацій дає змогу більш точно розрахувати коефіцієнти апроксимуючого полінома за допомогою метода найменших квадратів. Окрім цього, для зменшення рівня шуму сигнали можна попередньо фільтрувати у широкій смузі частот.

Результати наведених у даному розділі досліджень опубліковані в роботах [122-135].

#### **Висновки до розділу 4**

1) Розроблено та запатентовано автоматизовану систему раннього попередження пошкоджень.

2) Для вдосконалення системи функціональної діагностики інженерних та будівельних споруд на основі імітаційного моделювання розроблено підсистему візуалізації даних вимірювань, яка забезпечує виконання такої сукупності операцій: перетворення вихідних даних та їх введення в імітаційну модель; візуальне уявлення елементів модельованого об'єкта і управління моделлю (параметричне геометричне моделювання); імітація взаємодії елементів конструкції (імітаційне моделювання); обробка та візуальне відображення результатів моделювання.



3) У програмному середовищі CATIA було створено геометричну модель РВС об'ємом  $0,04 \text{ м}^3$ , яку обрано об'єктом контролю для процесів створення та налаштування розроблюваного програмного забезпечення. Усього модель містить 27 окремих елементів, 20 з яких належить до поясів.

4) На основі мови програмування Processing, яка дозволяє працювати з тривимірною графікою, реалізовано програму відображення на геометричній моделі ОК даних тензометричних вимірювань, попередньо записаних у файл. Обрано п'ять проміжків тестових даних: 0-10 умовних одиниць, 11-20 умовних одиниць, 21-30 умовних одиниць, 31-40 умовних одиниць, 41-50 умовних одиниць. Для кожного проміжку виділено свій колір відображення даних на геометричній моделі ОК. Розроблена програма дозволяє також проводити візуалізацію кутів нахилу (значення яких попередньо записані у файл) конструкції одночасно по трьом осям.

5) Готовий програмний продукт можна змінити та при необхідності розширити для виконання додаткових дій по візуалізації даних, отриманих з первинних перетворювачів.

6) Розроблено методику проведення вібраційних вимірів за допомогою макета каналу вимірювання вібрації та методику визначення малих лінійних переміщень фундаменту резервуара.

7) Розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для обробки сигналів вібрації з урахуванням вхідного діапазону та розрядності АЦП, а також запропонована попередня обробка вібраційних сигналів, що полягає у виключенні з отриманих вибірок постійної складової вимірювальних шумів, розрахованої по першим 512 точкам для обліку відхилення блоку акселерометрів від вертикальної і горизонтальної площин при його закріпленні на об'єкті контролю.

8) Для перевірки адекватності імітаційної моделі проведено порівняльний аналіз отриманих результатів скінчено-елементного моделювання та обробки сигналів вібрації, який показав, що об'єкт контролю здійснює в горизонтальній площині коливання по першим двом модам незалежно від обраного напрямку імпульсного впливу.

9) Розраховано значення абсолютної (20,4 Гц) і відносної (6,3 %) похибок визначення частот власних коливань за першою формою експериментальним шляхом і чисельними методами, які свідчать про те, що адекватність імітаційної моделі становить понад 90 %.

10) Розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для екстраполяції тренду, який визначається за середніми значеннями моделі сигналів деформації за допомогою методу найменших квадратів. Визначено, що точність прогнозу можна підвищити за рахунок збільшення кількості вихідних даних, а достовірність апроксимації – за рахунок наявності певної функціональної залежності між зміною середнього рівня деформацій.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-практична задача вдосконалення засобів функціональної діагностики резервуарів та засобів їх захисту від вітрового навантаження на основі імітаційного моделювання для забезпечення безаварійної експлуатації резервуарів, що знаходяться у важкодоступних місцях під впливом динамічних та кліматичних навантажень.

1. Аналіз сучасного стану методів та засобів функціональної діагностики резервуарів з ЕНР, які знаходяться у важкодоступних місцях під впливом динамічних та кліматичних навантажень, показав, що для попередження руйнування резервуарів та витоків ЕНР недостатньо лише проводити контроль цілісності та оцінювання загального ТС їх конструкції. Обґрунтовано необхідність оцінити відповідність реальних умов експлуатації розрахунковим значенням навантажень, розробити відповідні засоби захисту резервуарів від дії навантажень, що перевищують розрахункові значення, вдосконалити засоби функціональної діагностики з метою оцінки та прогнозування ТС елементів конструкції резервуарів. Запропоновано та обґрунтовано вирішити поставлені завдання на основі імітаційного моделювання, яке на сьогоднішній день є потужним інструментом наукових досліджень та перспективним напрямком розвитку засобів моніторингу та діагностики складних просторових об'єктів, що знаходяться у важкодоступних місцях під впливом динамічних та кліматичних навантажень.

2. Проведено геометричне та імітаційне моделювання резервуара в умовах вітрового навантаження для встановлення характеру і функціональної залежності впливу вітрового навантаження на резервуар, в результаті якого:

- створено шість основних геометричних моделей, які відрізняються наявністю фундаменту, повітряних дихальних клапанів та формою даху, та встановлено вплив елементів конструкції на характер розподілу швидкості повітряного потоку та його тиску на резервуар, на основі отриманих результатів обрано модель резервуару для подальших досліджень;

- в результаті імітаційного моделювання встановлено характер і функціональну залежність впливу вітрового навантаження на резервуар, за якою визначено три експлуатаційні області: область безпечної експлуатації при швидкостях повітряного потоку до 27,5 м/с; область появи напружень та пластичних деформацій в елементах конструкції резервуару при швидкостях повітряного потоку в межах від 27,5 м/с до 54 м/с; область потенційної втрати несучої здатності резервуару при швидкостях повітряного потоку понад 54 м/с;
- обґрунтовано необхідність розробки спеціальних засобів захисту резервуарів для розширення області їх безпечної експлуатації в умовах, коли вітрові навантаження перевищують розрахункові значення.

3. Для зниження величини тиску повітряного потоку розроблено, теоретично обґрунтовано та досліджено геометричні моделі засобів захисту резервуарів від вітрового навантаження різних форм у поперечному перерізі: коло, квадрат, зірка. Проведено аналіз ефективності засобів захисту для резервуарів з наземним та підземним фундаментами та встановлено, що величина зниження максимального тиску повітряного потоку на стінку резервуара, що обрана як показник ефективності, складає понад 60 % для резервуарів з наземним фундаментом та понад 50 % для резервуарів з підземним фундаментом.

Установлено спрощені функціональні залежності максимального тиску повітряного потоку на стінку резервуара з підземним фундаментом при використанні засобу захисту зіркоподібної форми від параметрів: діаметра обтічника, його висоти та міжосьової відстані.

Установлено, що використання розроблених засобів захисту від вітрового навантаження дозволить розширити зону безпечної експлуатації резервуара з підземним фундаментом на 45 %, а з наземним спеціальної конструкції – на 64 %.

4. Розроблено та обґрунтовано загальну структуру та принцип функціонування вдосконаленої багатоканальної системи функціональної діагностики резервуарів на основі використання імітаційних моделей, яка містить три вимірюва-

льні канали (вібраційний, тензометричний та інклінометричний), зовнішній модуль визначення величини природних чи техногенних збурень, підсистеми візуалізації результатів і прогнозування ТС елементів конструкції резервуару.

5. На основі імітаційного моделювання розроблено підсистему візуалізації даних тензометричних та інклінометричних вимірювань, яка забезпечує: перетворення вихідних даних та їх введення в імітаційну модель; візуальне уявлення елементів контрольованого об'єкта і керування моделлю (параметричне геометричне моделювання); імітацію взаємодії елементів конструкції (імітаційне моделювання); обробку та візуальне відображення результатів вимірювань. Розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для обробки та візуалізації вібраційних вимірювань і прогнозування зміни рівня деформацій елементів конструкції резервуару.

6. На основі порівняльного аналізу результатів експериментальних досліджень фізичної моделі резервуара і макета каналу вимірювання вібрації системи діагностики та результатів скінчено-елементного моделювання фізичної моделі резервуару встановлено, що адекватність імітаційної моделі становить понад 90 %, що є прийнятним для використання імітаційних моделей резервуара у підсистемі візуалізації системи функціональної діагностики.

7. Результати досліджень впроваджено в Національному антарктичному науковому центрі МОН України при розробці автоматизованої системи раннього попередження витoku палива на українській антарктичній станції Академік Вернадський та в навчальний процес кафедри приладів і систем орієнтації і навігації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Опасный производственный объект [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Опасный\\_производственный\\_объект](https://ru.wikipedia.org/wiki/Опасный_производственный_объект).
2. Удельные нормативы образования отходов производства и потребления при строительстве и эксплуатации производственных объектов ОАО «АК «Транснефть»: РД 153-39.4-115-01; утверждено Первым вице-президентом ОАО АК «Транснефть» В.В. Калининым 29.12.2001; ввод. в действие с 01.01.2002. – 272 с.
3. Сетков В.И. Строительные конструкции: Учебник [Текст] / В.И. Сетков, Е.П. Сербин. – М.: ИНФРА-М, 2005. – 448 с.
4. Маилян Р.Л. Строительные конструкции [Текст] / Р.Л. Маилян, Д.Р. Маилян, Ю.А. Веселев. – Ростов н/Д: Феникс, 2005. – 880 с.
5. ДБН В.2.6-163:2010. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу. – Введ. 22.08.2011. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 127 с.
6. ДБН В.2.6-198:2014 Сталеві конструкції. Норми проектування. – Введ. 01.01.2015. – К.: Мінрегіонбуд України, 2015.
7. ДБН В.2.6-165:2011 Алюмінієві конструкції. Основні положення. – Введ. 19.12.2011. – К.: Мінрегіонбуд України, 2012.
8. ДБН В.2.6-161:2010 Конструкції будинків і споруд. Дерев'яні конструкції. Основні положення. – Введ. 01.09.2011. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 112 с.
9. ДБН В.2.6-98:2009 Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. – Введ. 01.07.2011. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 75 с.
10. ДБН В.2.6-162:2010 Конструкції будинків і споруд. Кам'яні та армокам'яні конструкції. Основні положення. – Введ. 01.09.2011. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 107 с.

11. Кудишин Ю.И. Металлические конструкции [Текст] / Ю.И. Кудишин, Е.И. Беленя, В.С. Игнатъева и др.. – М.: Издательский центр «Академия», 2007. – 688 с.
12. Барашиков А.Я. Оцінка технічного стану будівельних конструкцій промислових будинків і споруд [Текст] / А.Я. Барашиков, О.М. Малишев. – К.: НМЦ Держнаглядохоронпраці України, 1998. – 232 с.
13. Голосов В.Н. Инженерные конструкции [Текст] / В.Н. Голосов, В.В. Ермолов, Н.В. Лебедева [и др.]. – М.: Высшая школа, 1991. – 408 с.: ил.
14. Попов Н.Н. Проектирование и расчет железобетонных и каменных конструкций [Текст] / Н.Н. Попов, А.В. Забегаев. – М.: Высшая школа, 1989. – 400 с.
15. Берген Р.И. Инженерные конструкции [Текст] / Р.И. Берген, Ю.М. Дукарский, В.Б. Семенов, Ф.В. Расс. – М.: Высшая школа, 1989. – 415 с.: ил.
16. Иванов. В.А. Конструкции из дерева и пластмасс. Примеры расчета и конструирования: Учеб. пособие для вузов [Текст] / В.А. Иванов. – Киев: Вища школа, 1981. – 392 с.
17. Семенцов С.А. Справочник проектировщика. Каменные и армокаменные конструкции [Текст] / С.А. Семенцов, В.А. Камейко. – М.: Издательство литературы по строительству, 1968. – 175 с.
18. Типы конструкций. Основные термины. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.promalpindustry.ru/poleznaya-informatsiya/slovari/slovari-terminov/tipyi-konstruktsiy>.
19. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. – Введ. 2007.01.01. – Київ: Мінбуд України, 2006. – 75 с.
20. СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. – Введ. 2011.05.20. – М: ОАО «ЦПП», 2011. – 96 с.
21. ДБН 362-92 Оцінка технічного стану сталевих конструкцій виробничих будинків і споруд, що експлуатуються. – Введ. 01.07.1992. – Київ: Держбуд України, 2009. – 47 с.
22. ДБН В.3.2-2-2009. Житлові будинки. Реконструкція та капітальний ремонт. – Введ. 22.07.2009. – Київ: Мінрегіон України, 2009. – 19 с.

23. ВСН 53-86. Правила оценки физического износа жилых зданий. – М.: Госг-  
ражданстрой, 1998. – 72с.
24. ДСТУ-Н Б А.3.1-10:2008. Настанова з проведення технічного діагностування  
вертикальних сталевих резервуарів. – Введ. 16.12.07/2008. – К.: Мінрегіонбуд  
України, 2009. – 13 с.
25. Типовая инструкция по эксплуатации металлических резервуаров для хране-  
ния жидкого топлива и горячей воды. Строительные конструкции: РД  
34.21.526-95; утверждено Департаментом науки и техники РАО «ЕЭС Рос-  
сии» 01.07.94; введ. в действие с 01.09.1995.
26. Пособие по обследованию строительных конструкций зданий [Електронний  
ресурс]. – Режим доступа: <http://www.complexdoc.ru/ntdtext/485540>.
27. Резервуары и технологическое оборудование [Електронний ресурс]. – Режим  
доступа: <http://www.gazovik-neft.ru/directory/info/fire-fighting/p-01.html>.
28. Биргер И.А. Сопротивление материалов [Текст] / И.А. Биргер, Р.Р. Мавлю-  
тов. – М.: Наука, 1986. – 560 с.
29. Комплексний аналіз технічної документації на інфраструктуру української  
антарктичної станції Академік Вернадський: звіт по НДР / Національний тех-  
нічний університет України «КПІ»; кер. Бурау Н.І.; вик. Шевчук Д.В. [та ін-  
ші]. – К., 2010. – 129 с. – № ДР 0110U004991.
30. Сферы применения [Електронний ресурс]. – Режим доступа:  
<http://zaopem.ru/scope>.
31. The Replacement of Fuel Tanks at Vernadsky Station [Електронний ресурс]. –  
Режим доступа: [http://www.ats.aq/documents/ATCM30/ip/ATCM30\\_ip030\\_e.doc](http://www.ats.aq/documents/ATCM30/ip/ATCM30_ip030_e.doc).
32. Андрусевич А. Довідник чинних міжнародних договорів України у сфері  
охорони довкілля [Текст] / А. Андрусевич, Н. Андрусевич, З. Козак. – Львів,  
2009. – 203 с.
33. Договір про Антарктику [Електронний ресурс]. – Режим доступа:  
[http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=995\\_224](http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=995_224).



34. Антарктичний договір [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://uk.wikipedia.org/wiki/Антарктичний\\_договір](http://uk.wikipedia.org/wiki/Антарктичний_договір).
35. Конвенція про збереження морських живих ресурсів Антарктики [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=995\\_045](http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=995_045).
36. Протокол про охорону навколишнього середовища до Договору про Антарктику [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=995\\_645](http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=995_645).
37. Про затвердження Державної цільової науково-технічної програми проведення досліджень в Антарктиці на 2011-2020 роки [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1002-2010-п>.
38. Наукова діяльність України в Антарктиці на десятирічний період [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.uac.gov.ua/custom\\_content\\_source\\_list/uaj/uaj9/UAJ\\_N\\_9\\_7-15.pdf](http://www.uac.gov.ua/custom_content_source_list/uaj/uaj9/UAJ_N_9_7-15.pdf).
39. Федотов А. В., Скабкин Н. Г. Основы теории надежности и технической диагностики. Конспект лекций [Текст] / А. В. Федотов, Н. Г. Скабкин. – Омск: ОмГТУ, 2010. – 64 с.
40. ГОСТ 20911-89. Техническая диагностика. Термины и определения. – Введ. 01.01.1991. – М.: Стандартинформ, 2009. – 9 с.
41. Смирнов В.О. Методы и средства функциональной диагностики и контроля технологических процессов на основе электромагнитных датчиков [Текст] / В.О. Смирнов. – Ульяновск: УлГТУ, 2001. – 190 с.
42. Пат. 87792 РФ, МПК G01 М 7/00, G01 В 7/16. Система мониторинга безопасной эксплуатации зданий и инженерно-строительных сооружений / Рубин К.С., Рубин А.С.; заявитель и патентообладатель ООО «Инновационно-производственное предприятие "Практика"». – № 2008141363/22; заявл. 22.01.2009; опубликовано 20.10.2009.
43. Карманов С.В. Техническая диагностика – основа рационального обслуживания [Текст] / С.В. Карманов // Энергетик. – 1998. – №10. – С. 36.

44. Кудрявцев Е.М. Диагностика ЯЭУ. Конспект лекций [Текст] / Е. М. Кудрявцев, Г. А. Сарычев. – Москва: МИФИ, 2008.
45. Ершов Д.Ю. Техническое диагностирование и методы контроля механических узлов в машиностроении [Текст] / Д. Ю. Ершов // Молодой ученый. – 2013. – №4. – С. 62-64.
46. Каневский И.Н. Неразрушающие методы контроля: учеб. пособие [Текст] / И.Н. Каневский, Е.Н. Сальникова. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 243 с.
47. Вибрационная диагностика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Вибрационная\\_диагностика](https://ru.wikipedia.org/wiki/Вибрационная_диагностика).
48. Summary Review of Vibration-Based Damage Identification Methods [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://public.lanl.gov/prime/doebbling\\_svd.pdf](http://public.lanl.gov/prime/doebbling_svd.pdf).
49. Пугачев В.М. Роль информационных технологий в науке и образовании [Текст] / В.М. Пугачев, Е.Г. Газенаур // Вестник КемГУ. – 2009. – №9. – С. 31-34.
50. Візуалізація інформації [Електронний ресурс]. – Режим доступа: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Візуалізація\\_інформації](https://uk.wikipedia.org/wiki/Візуалізація_інформації).
51. Духанов А.В. Имитационное моделирование сложных систем: курс лекций [Текст] / А.В. Духанов, О.Н. Медведева; Владим. гос. ун-т. – Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2010. – 115с.
52. Беспроводная передача энергии на 5 метров [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://habrahabr.ru/post/219857>.
53. Тонны электропроводов на свалку, или История создания технологии резонансной передачи энергии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.computerra.ru/60133/tonnyi-elektroprovodov-na-svalku-ili-istoriya-sozdaniya-tehnologii-rezonansnoy-peredachi-energii>.
54. Востров В.К. Вопросы расчета вертикальных цилиндрических стальных резервуаров при проектировании и техническом диагностировании [Текст] / В.К. Востров // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2006. – №7. – С. 9-16.

55. Востров В.К. Оптимизация высот поясов стенки резервуара [Текст] / В.К. Востров, А.А. Василькин // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2005. – № 11.
56. Востров В.К., Павлов А.Б. Вопросы расчета экстремальных снеговых нагрузок на купольные покрытия [Текст] / В.К. Востров, А.Б. Павлов // ПГС. – 2005. – №7.
57. Петров А.А. Оценка воздействия пульсационной ветровой нагрузки на вертикальные цилиндрические резервуары [Текст] / А.А. Петров // Строит. механика и расчет сооружений. – 1995. – № 3.
58. Востров В.К., Катанов А.А. Расчет напряжений и перемещений в уторном узле и окрайках днища резервуаров [Текст] / В.К. Востров, А.А. Катанов // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2005. – № 8.
59. Джерела незадовільного технічного стану будівель і споруд та причини їх аварій. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://librar.org.ua/sections\\_load.php?s=building&id=242](http://librar.org.ua/sections_load.php?s=building&id=242).
60. Еремін А.К. О причинах возникновения рисков аварийного обрушения зданий и сооружений [Текст] / А.К. Еремін, Е.С. Мухарицин // ГеоРиск. – 2009. – № 3. – С.54-55.
61. Купрейшвили С.М. Разрушения в процессе эксплуатации вертикальных цилиндрических резервуаров со стационарной крышей [Текст] / С.М. Купрейшвили // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2005. – №7. – С. 8-14.
62. Причинно-следственный анализ аварий вертикальных стальных резервуаров [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.ogbus.ru/authors/Kondrashova/Kondrashova\\_1.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Kondrashova/Kondrashova_1.pdf).
63. Кузько О.В. Резервуар для пального на станції Вернадський: кількісна оцінка загроз, що призводять до аварій [Текст] / О.В. Кузько, Н.І. Бурау, Ю.Г. Жуковський, О.А. Киричук, О.О. Лук'янченко // VI міжнародна Антарктична конференція «Інтернаціоналізація досліджень в Антарктиці – шлях до духовної єдності людства» / НТУУ «КПІ». – Київ, 2013. – С. 341-343.

64. Бородин Ю.П. Система комплексного диагностического мониторинга опасных производственных объектов [Текст] / Ю.П. Бородин, В.Г. Харебов, В.А. Шапорев // В мире неразрушающего контроля. – 2006. – № 4 (34). – С. 13-17.
65. Система диагностического мониторинга опасных производственных объектов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.interunis.ru/ru/articles/statya-1.html>.
66. Мельчаков А.П. Расчет и оценка риска аварии и безопасного ресурса строительных объектов (Теория, методики и инженерные приложения): Учебное пособие [Текст] / А.П. Мельчаков. – Челябинск: Издательство ЮурГУ, 2006. – 49 с.
67. Marcato G. Site investigation and modelling at «La Maina» landslide (Carnian Alps, Italy) [Текст] / G. Marcato, M. Mantovani, A. Pasuto, S. Silvano, F. Tagliavini, L. Zabuski, A. Zannoni // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. – 2006. – №6. – pp. 33-39.
68. Савицкий Г.А. Ветровая нагрузка на сооружения [Текст] / Г.А. Савицкий. – М.: Стройиздат, 1972. – 110с.
69. Michoud C. Experiences from site-specific landslide early warning systems [Текст] / C. Michoud, S. Bazin, L. H. Blikra, M. H. Derron, M. Jaboyedoff // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. – 2013. – №13. – pp. 2659-2673.
70. Li Q. Evaluation Model of Landslide Lake Risk Disposal Based on CFNN [Текст] / Q. Li, S. Wang, X. Huang // Journal of Applied Sciences. – 2013. – Vol. 13 (10). – pp. 1746-1752.
71. Qiao G. Landslide Investigation with Remote Sensing and Sensor Network: From Susceptibility Mapping and Scaled-down Simulation towards in situ Sensor Network Design [Текст] / G. Qiao, P. Lu, M. Scaioni, S. Xu and others // Remote Sensing. – 2013. – Vol. 5 (9). – pp. 4319-4346.
72. Самарский А.А. Введение в численные методы [Текст] / А.А. Самарский. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 272 с.

73. Adeyefa O. Finite element analysis of von-mises stress distribution in a spherical shell of liquified natural gas (LNG) pressure vessels [Текст] / O. Adeyefa, O. Oluwole // Engineering. – 2011. – №3. – pp. 1012-1017.
74. Разрушение резервуара PBC-10000 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cae-services.ru/data/181M.pdf>.
75. Определение гидродинамических нагрузок воздействия волны прорыва, образующейся при квазимгновенном разрушении вертикального стального резервуара (PBC), на ограждающую стенку [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cae-services.ru/data/160M.pdf>.
76. Сейсмическое воздействие на резервуар с жидкостью [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cae-services.ru/data/105M.pdf>.
77. Численное моделирование сейсмического воздействия на резервуар с применением программы LS-DYNA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cae-services.ru/data/192M.pdf>.
78. Параметрический резонанс в баке [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cae-services.ru/data/120M.pdf>.
79. Badran O. The vibration of partially filled cylindrical tank subjected to variable acceleration [Текст] / O. Badran, M. S. Gaith, A. Al-Solihat // Engineering. – 2012. – №4. – pp. 540-547.
80. Гліненко Л.К. Основи моделювання технічних систем [Текст] / Л.К. Гліненко, О.Г. Сухоносів. – Львів: «Бескид Біт», 2003. – 176 с.
81. Томашевский В.М. Моделирование систем [Текст] / В.М. Томашевский. – К.: Видавнична група BVH, 2005. – 352 с.: іл.
82. Компьютерное моделирование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/28140/>.
83. Морозов К.Е. Математическое моделирование в научном познании [Текст] / К.Е. Морозов. – М.: Мысль, 1969. – 212 с.
84. ГОСТ 2.052-2006. Единая система конструкторской документации. Электронная модель изделия. Общие положения. – Введ. 01.09.2006. – М.: «Стандартинформ», 2007. – 12 с.

85. ГОСТ 34.003-90 Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Термины и определения. – Введ. 01.01.1992. – М.: Издательство стандартов, 1997. – 14 с.
86. ГОСТ 23501.101-87 Системы автоматизированного проектирования. Основные положения. – Введ. 01.07.1988. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 10 с.
87. Методические указания. Автоматизированные системы. Основные положения: РД 50-680-88: утверждено Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам 28.12.88; ввод. в действие с 01.01.90.
88. Розробка автоматизованої системи раннього попередження можливості витоку палива на українській антарктичній станції Академік Вернадський: звіт по НДР / Національний технічний університет України «КПІ»; кер. Бурау Н.І.; вик. Цибульник С.О. [та інші]. – К., 2011. – 91 с. – № ДР 0111U008931.
89. Основы системного проектирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.cfin.ru/management/controlling/sys\\_project.shtml](http://www.cfin.ru/management/controlling/sys_project.shtml)
90. Устройство оснований и фундаментов резервуаров [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://r-stroitel.ru/construction/fundament/>.
91. Иванов Ю.К. Основания и фундаменты резервуаров [Текст] / Ю.К. Иванов, П.А. Коновалов, Р.А. Мангушев, С.Н. Сотников. – М.: Стройиздат, 1989. – 223 с.: ил.
92. FlowVision [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.tesis.com.ru/software/flowvision/>.
93. Самарский А.А. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры [Текст] / А.А. Самарский, А.П. Михайлов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 320 с.
94. Кондранин Т.В. Применение пакетов прикладных программ при изучении курсов механики жидкости и газа: Учебное пособие [Текст] / Т.В. Кондранин, Б.К. Ткаченко, М.В. Березникова, А.В. Евдокимов, А.П. Зуев. – М.: МФТИ, 2005. – 104 с.
95. Антарктида [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://uk.wikipedia.org/wiki/Антарктида>.

96. Антарктический климат [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Антарктический\\_климат](https://ru.wikipedia.org/wiki/Антарктический_климат).
97. Цыбульник С.А. Построение пространственной модели объекта мониторинга [Текст] / С.А. Цыбульник, Д.В. Шевчук // IV науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2011. – С. 48.
98. Цыбульник С.А. Исследование ветровой загрузки на резервуар с дизельным топливом в условиях Антарктики [Текст] / Н.И. Бурау, Ю.Г. Жуковский, С.А. Цыбульник, Д.В. Шевчук// Материалы XIX международной конференции «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики» (3-7 октября 2011г., г. Гурзуф). – Гурзуф, 2011. – С.70-72.
99. Цыбульник С.А. Трехмерная модель резервуара для хранения топлива в Антарктике [Текст] / Ю.Г. Жуковский, А.М. Главацкий, А.В. Кузько, С.А. Цыбульник// X міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування 2011: стан і перспективи». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2011. – С. 21-22
100. Цыбульник С.А. Предотвращение утечек в резервуаре для хранения эколого-опасных веществ в Антарктиде [Текст] / С.А. Цыбульник, Д.В. Шевчук // XIV міжнародна науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Екологія. Людина. Суспільство». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ». – Київ, 2011. – С. 247-248.
101. Цыбульник С.А. Геометрическое и имитационное моделирование резервуара для топлива [Текст] / С.А. Цыбульник, Д.В. Шевчук // 3-тя науково-практична конференція студентів і молодих учених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання». Збірник тез доповідей. – Івано-Франківськ, 2011. – С. 165-166.
102. Цыбульник С.А. Выбор геометрической модели резервуара для хранения топлива [Текст] / С.А. Цыбульник, Д.В. Шевчук // V науково-практична конференція студентів та аспірантів «Погляд у майбутнє приладобудування».



- Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2012. – С. 44.
103. Цыбульник С.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния вертикального стального резервуара [Текст] / С.А. Цыбульник // Первая Всеукраинская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные тенденции развития приборостроения» (19-20 ноября 2012г. г. Луганск, Украина). Сборник тезисов докладов / ВНУ ім. В. Даля, кафедра «Прилади». – Луганськ, 2012. – С. 314-315
  104. Tsybulnik S.A. Simulation of the impact of wind load on the vertical steel tank [Текст] / N.I. Bouraou, Y.G. Zsukovskiy, A.V. Kuzko, S.A. Tsybulnik, D.V. Shevchuk // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2012. – Вип. 44. – С. 70-80.
  105. Шеин А.И. Оптимизация многомассовых гасителей колебаний при гармоническом воздействии [Текст] / А. И. Шеин, О. Г. Земцова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2010. – №1 (13). – С. 113-121.
  106. Обтекатель [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Обтекатель>.
  107. Розробка автоматизованої системи раннього попередження можливості витоку палива на українській антарктичній станції Академік Вернадський: звіт по НДР / Національний технічний університет України «КПІ»; кер. Бурау Н.І.; вик. Цибульник С.О. [та інші]. – К., 2013. – 177 с. – № ДР 0113U004970.
  108. Корнюшин П.Н. Численные методы [Текст] / П.Н. Корнюшин. – Владивосток: Издательство Дальневосточного университета, 2002. – 104 с.
  109. Цибульник С.О. Зменшення динамічних збурень, викликаних вітровим навантаженням на резервуар для пального [Текст] / С.О. Цибульник, Д.В. Шевчук // VI міжнародна Антарктична конференція «Інтернаціоналізація досліджень в Антарктиці – шлях до духовної єдності людства» / НТУУ «КПІ». – Київ, 2013. – С. 352-355.



110. Цыбульник С.А. Защита вертикальных стальных резервуаров от ветровой нагрузки [Текст] / С.А. Цыбульник // 4-та науково-практична конференція студентів і молодих учених «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання». Збірник тез доповідей. – Івано-Франківськ, 2013. – С. 193-194.
111. Цыбульник С.А. Эффективное средство защиты резервуаров от ветровой нагрузки. Часть 1. Построение геометрической модели обтекателя [Текст] / С.А. Цыбульник // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – Київ, 2013. – Вип. 46. – С. 80-85.
112. Цыбульник С.А. Эффективное средство защиты резервуаров от ветровой нагрузки. Часть 2. Моделирование ветровой нагрузки [Текст] / С.А. Цыбульник // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – Київ, 2014. – Вип. 47. – С. 119-126.
113. Цыбульник С.А. Средство пассивной защиты резервуаров от ветровой нагрузки в условиях антарктики [Текст] / Н.И. Бурау, А.В. Кузько, С.А. Цыбульник // Український антарктичний журнал. – Київ, 2014. – №13. – С. 275-280.
114. Імітаційне та фізичне моделювання автоматизованої системи запобігання витокам палива на українській антарктичній станції «Академік Вернадський» / Національний технічний університет України «КПІ»; кер. Бурау Н.І.; вик. Цибульник С.О. [та інші]. – К., 2015. – 152 с. – № ДР 0115U005639.
115. Processing [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Processing>.
116. Reas C. Getting Started with Processing / C. Reas, B. Fry. – Sebastopol: O'Reilly Media, 2010. – 208p.
117. Рендерер [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://plmpedia.ru/wiki/Рендерер>.
118. Autodesk 3ds MAX [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Autodesk\\_3ds\\_MAX](https://uk.wikipedia.org/wiki/Autodesk_3ds_MAX).
119. Методы прогнозной экстраполяции [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.rae.ru/monographs/10-168>.

120. Садовникова Н.А. Анализ временных рядов и прогнозирование. Учебное пособие [Текст] / Н.А. Садовникова, Р.А. Шмойлова / Московский государственный университет экономики, статистики и информатики. – М., 2001г.. – 67 с.
121. Пат. 2374682 РФ, МПК G06F17/17. Способ прогнозирования результатов измерений и устройство его реализующее / Марчук В.И., Шерстобитов А.И. и др.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «ЮРГУЭС». – № 2008104547/09; заявл. 06.02.2008; опубликовано 27.11.2009.
122. Цибульник С.О. Вимоги до розробки інформаційно-діагностичного комплексу моніторингу резервуарів з паливом в умовах Антарктики [Текст] / Н.І. Бурау, Ю.Г. Жуковський, О.В. Кузько, С.О. Цибульник, Д.В. Шевчук // Вісник НТУУ «КПІ». Серія Приладобудування. – Київ, 2013. – Вип. 45. – С. 107-115.
123. Цибульник С.А. Концепция визуализации данных в информационно-диагностических комплексах [Текст] / Н.И. Бурау, С.А. Цибульник // Вісник інженерної академії України. – Київ, 2015. – №1. – С. 96-99.
124. Пат. 73310 Україна, МПК G01 М 7/00. Інформаційно-діагностичний комплекс моніторингу і прогнозування технічного стану інженерно-будівельних споруд / Бурау Н.І., Жуковський Ю.Г., Кузько О.В., Цибульник С.О., Шевчук Д.В.; заявник і патентовласник НТУУ «КПІ». – №U201115682; заявл. 30.12.13; опубліковано 25.09.2012, Бюл. № 18. – 4 с.: іл.
125. Пат. 82968 Україна, МПК G01 М 7/00. Автоматизований діагностичний комплекс моніторингу і прогнозування технічного стану будівель та споруд / Артем'єва Г.М., Бурау Н.І., Кузько О.В., Жуковський Ю.Г., Цибульник С.О., Шевчук Д.В.; заявник і патентовласник НТУУ «КПІ». – №U201301413; заявл. 06.02.13; опубліковано 27.08.2013, Бюл. № 16. – 3 с.: іл.
126. Цибульник С.О. Інформативно-діагностичний комплекс моніторингу та прогнозування технічного стану будівель та споруд [Текст] / С.О. Цибульник, Д.В. Шевчук // V науково-практична конференція студентів та аспірантів

- «Погляд у майбутнє приладобудування». Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2012. – С. 45.
127. Цыбульник С.А. Функциональная диагностика резервуаров для хранения экологически-опасных веществ [Текст] / С.А. Цыбульник // XIII міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (23-24 квітня 2014р. м. Київ, Україна). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2014. – С. 24-25.
  128. Цыбульник С.А. Перспективы развития систем функциональной диагностики инженерных сооружений [Текст] / С.А. Цыбульник // VII міжнародна Антарктична конференція «Антарктичні дослідження: нові горизонти та пріоритети» / НТУУ «КПІ». – Київ, 2015. – С. 163-165.
  129. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 61750, Комп'ютерна програма «Програма візуального відображення даних тензометричних вимірювань», Цыбульник С.О., Півторак Д.О., дата реєстрації – 18.09.2015. Державна служба інтелектуальної власності України.
  130. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 61751, Комп'ютерна програма «Програма обробки сигналів вібрації», Цыбульник С.О., Шевчук Д.В., Півторак Д.О., дата реєстрації – 18.09.2015. Державна служба інтелектуальної власності України.
  131. Пат. 73359 Україна, МПК G01 Н 11/00. Спосіб вимірювання малих лінійних переміщень протизсувних споруд / Бурау Н.І., Жуковський Ю.Г., Куліш Е.В., Цыбульник С.О., Шевчук Д.В.; заявник і патентовласник НТУУ «КПІ». – №U201201740; заявл. 16.02.12; опубліковано 25.09.2012, Бюл. № 18. – 2 с.: іл.
  132. Цыбульник С.А. Исследование макета канала измерения вибрации комплексной системы мониторинга вертикальных стальных резервуаров [Текст] / Н.И. Бурау, С.А. Цыбульник, Д.В. Шевчук // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків: Технол. центр, 2015. – Вип. 5. – №9 (77). – С. 45-52.
  133. Цыбульник С.А. Определение собственных частот вертикального стального резервуара по данным виброизмерений [Текст] / С.А. Цыбульник // XIV

- міжнародна науково-технічна конференція «Приладобудування: стан і перспективи» (22-23 квітня 2015р. м. Київ, Україна). Збірник тез доповідей / НТУУ «КПІ», Приладобудівний факультет. – Київ, 2015. – С. 25-26.
134. Цибульник С.О. Імітаційне та фізичне моделювання системи моніторингу конструкцій в експлуатації [Текст] / Н.І. Бурау, С.О. Цибульник, Д.В. Шевчук // IV міжнародна науково-технічна конференція «Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування» / ТНТУ ім. Івана Пулюя. – Тернопіль: ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2015. – С. 98-101.
135. Цыбульник С.А. Сравнительный анализ методов обработки вибрационных сигналов [Текст] / С.А. Цыбульник, А.С. Попов // Новые направления развития приборостроения. Материалы 8-й международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов (24 апреля 2015г. Г. Минск, Республика Беларусь) / БНТУ, Приборостроительный факультет. – Минск, 2015. – С. 242.

ДОДАТОК А  
«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор ДУ  
Національний антарктичний  
науковий центр  
Міністерства освіти і науки України

 В.А. Литвинов

« 15 » 10 2015 р.

№ \_\_\_\_\_

Щодо впровадження  
результатів дисертації

**АКТ**  
**впровадження результатів дисертації**


Ми, що нижче підписалися, Мороз І.В., головний інженер, Кузько О.В., завідувач відділу науково-технічної інформації, склали дійсний акт про те, що наукові та практичні результати дисертаційних досліджень Цибульника С.О. за темою **«Вдосконалення засобів функціональної діагностики та захисту резервуарів на основі імітаційного моделювання»**, яка виконувалась на кафедрі приладів і систем орієнтації та навігації НТУУ «КПІ», є важливими і використовуються для розробки автоматизованої системи раннього попередження можливості витoku палива на українській антарктичній станції Академік Вернадський (згідно з переліком проектів Державної цільової науково технічної програми проведення досліджень в Антарктиці на 2011-2020 роки), а саме:

- діагностичні моделі вертикального сталевого резервуару при зовнішніх динамічних збуреннях;
- технологічне програмне забезпечення.

Головний інженер

 І.В. Мороз

Завідувач відділу  
науково-технічної інформації

 О.В. Кузько

Виконавець: Кузько О.В. (тел. 246 3880)

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Декан приладобудівного факультету  
Національного технічного університету України  
“Київський політехнічний інститут”



Г.С. Тимчик

2015 р.

## АКТ

### впровадження результатів дисертаційних досліджень в навчальний процес Національного технічного університету України «КПІ»

Ми, що підписалися нижче, заступник декана з методичної роботи к.т.н. Філіппова М.В., доцент кафедри приладів і систем орієнтації і навігації Мироненко П.С., вчений секретар кафедри приладів і систем орієнтації і навігації Павловський О.М. склали цей акт про те, що результати дисертаційних досліджень Цибульника С.О. за темою **«Вдосконалення засобів функціональної діагностики та захисту резервуарів на основі імітаційного моделювання»** використовуються в навчальному процесі кафедри приладів і систем орієнтації і навігації (ПСОН) приладобудівного факультету НТУУ «КПІ».

А саме: методики побудови геометричних моделей елементів конструкцій об'єктів та складальних одиниць використані в дисципліні «Системи САЕ/CAD»; елементи прикладного програмного забезпечення використовуються в дисципліні «Мікропроцесорна техніка»; розроблені алгоритми обробки сигналів вібрації використовуються в дисципліні «Методи обробки інформації».

Заст. декана  
з методичної роботи

М.В. Філіппова

Доцент кафедри ПСОН

П.С. Мироненко

Вчений секретар  
кафедри ПСОН

О.М. Павловський

« 15 » лютого 2015р.



