

**ДЕРЖАВНА СЛУЖБА НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ УКРАЇНИ**

О. М. СЕРІКОВА

**ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ
ЕКСПЛУАТАЦІЇ РЕЗЕРВУАРІВ ЗБЕРІГАННЯ
РІДКИХ ВУГЛЕВОДНІВ ПРИ СЕЙСМІЧНИХ
НАВАНТАЖЕННЯХ: ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА
МОНОГРАФІЯ**

Черкаси – 2024

УДК 504.05 : 628.5 (477)

С 32

Рекомендовано до друку вченою радою
Національного університету цивільного захисту України
(протокол № 12 від 27.12.2024)

Рецензенти:

Тютюник Вадим Володимирович, д. т. н., проф., начальник кафедри управління та організації діяльності у сфері цивільного захисту факультету ЦЗ НУЦЗ України;

Чумаченко Сергій Миколайович, д. т. н, с. н. с., провідний науковий співробітник Державного науково-дослідного інституту авіації;

Стрельнікова Олена Олександрівна, д. т. н., проф., провідний науковий співробітник Інституту енергетичних машин і систем ім. А. М. Підгорного Національної академії наук України

Серікова О. М.

С 32

Підвищення рівня екологічної безпеки експлуатації резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях: теорія та практика : монографія. Черкаси : Факт , 2024. 352 с.

ISBN 978-617-8175-47-4

У монографії розглядається комплекс теоретичних та прикладних питань підвищення рівня екологічної безпеки експлуатації резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях. На основі синтезу знань різних галузей науки визначено вплив сейсмічних навантажень на резервуари та довкілля, проаналізовано основні екологічні загрози та запропоновано шляхи їх мінімізації. Розроблено теоретичні засади та практичні рекомендації щодо підвищення сейсмостійкості резервуарів і зниження техногенного впливу на навколишнє середовище. Запропоновано комплекс заходів, спрямованих на удосконалення рішень та підходів до експлуатації з метою забезпечення екологічної безпеки при зберіганні рідких вуглеводнів в умовах сейсмічних впливів.

Для науковців, практичних працівників, викладачів, курсантів, студентів та всіх тих хто цікавиться проблематикою підвищення рівня екологічної безпеки експлуатації резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях на сучасному етапі.

УДК 504.05 : 628.5 (477)

ISBN 978-617-8175-47-4

© Серікова О. М., 2024

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8

РОЗДІЛ 1.

СТАН ПИТАННЯ, ПОВ'ЯЗАНИЙ З ТЕХНОГЕННИМ ВПЛИВОМ НА ДОВКІЛЛЯ ВІД ПРОЦЕСУ ЗБЕРІГАННЯ РІДКИХ ВУГЛЕВОДНІВ В РЕЗЕРВУАРАХ ПРИ СЕЙСМІЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

1.1. Аналіз сейсмічних навантажень на території України	10
1.2. Аналіз невизначеності сейсмічної небезпеки.....	17
1.3. Аналіз проявів техногенних землетрусів на території України	20
1.4. Аналіз підсилюючих факторів сейсмічної небезпеки	29
1.5. Аналіз проблеми розвитку підтоплення на території розміщення резервуарів.....	34
1.6. Аналіз стану забезпечення екологічної безпеки резервуарів зберігання рідких вуглеводнів в умовах сейсмічних навантажень	41
1.7. Аналіз сейсмічних впливів на резервуари зберігання рідких вуглеводнів	44
1.8. Екологічна небезпека процесу зберігання рідких вуглеводнів в резервуарах	50
1.8.1. Техногенний вплив на ґрунти	53
1.8.2. Техногенний вплив на підземні води	64
1.8.3. Забруднення атмосферного повітря	65
1.8.4. Вплив нафти на рослинність	67
1.9. Аналіз причин виникнення пожеж в резервуарах зберігання рідких вуглеводнів	68

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ВПЛИВУ СЕЙСМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА СТІЙКІСТЬ РЕЗЕРВУАРІВ

2.1. Математичне моделювання параметрів землетрусів	72
2.2. Математичне моделювання плескань рідини в резервуарах, викликаних сейсмічними навантаженнями методами нечіткої логіки	78
2.3. Моделювання динамічних характеристик оболонкових конструкцій	92

2.4. Моделювання демпфування коливань рідких вуглеводнів в резервуарах за допомогою встановлення мембран.....	96
2.5. Моделювання впливу обводненості ґрунту на стійкість резервуарів в умовах сейсмічної активності	101
2.5.1. Одновимірний випадок моделювання рівня ґрунтових вод.....	102
2.5.2. Моделювання процесів зміни рівня ґрунтових вод у 3d постановці	106
2.5.3. Моделювання процесів зміни рівня ґрунтових вод у 2d постановці	110
2.6. Дослідження гідрогеодинамічних ефектів землетрусів	110

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МЕТОДУ ЗБЕРІГАННЯ РІДИНИ В РЕЗЕРВУАРАХ РІЗНОЇ ФОРМИ ПРИ СЕЙСМІЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

Аварії резервуарів різної форми, викликані сейсмічними впливами	116
3.2. Основні несправності резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях.....	137
3.3. Використання резервуарів різних форм для зберігання рідин при вітрових та сейсмічних навантаженнях.....	142
3.4. Зберігання рідини в призматичних резервуарах при вібраційних навантаженнях.....	146
3.5. Коливання еолової рідини в конічних резервуарах з перегородками при вітровому навантаженні з нечіткими параметрами	166

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА МЕТОДУ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РЕЗЕРВУАРІВ В УМОВАХ ПІДВИЩЕННЯ СЕЙСМІЧНОЇ АКТИВНОСТІ

4.1. Розробка методики оцінки параметрів землетрусів.....	179
4.2. Реалізація методів нечіткої логіки	180
4.3. Методика визначення динамічних характеристик оболонкових конструкцій.....	188
4.4. Забезпечення демпфування коливань рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях	196
4.4.1. Встановлення плаваючої мембрани в резервуарах	197

4.4.2 Розробка корисної моделі вертикального циліндричного резервуара для зберігання небезпечних рідин	208
4.4.3. Моделювання впливу внутрішніх перегородок в резервуарах на рівень плескань вільної поверхні рідини при сейсмічних навантаженнях	210
4.5. Оцінка впливу обводненості ґрунту на стійкість резервуару в умовах сейсмічної активності.....	215
4.6. Прогнозування впливу техногенної сейсміки на стійкість резервуарів.....	221
4.7. Розробка методу підвищення рівня екологічної безпеки експлуатації резервуарів в умовах підвищення сейсміки	223

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА МЕТОДУ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РЕЗЕРВУАРІВ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ НАНОМАТЕРІАЛІВ В КАРКАСІ РЕЗЕРВУАРУ

5.1. Пожежна небезпека статичної електрики в резервуарах.....	225
5.2. Нейтралізація статичної електрики в резервуарах зберігання рідких вуглеводнів	238
5.3. Дослідження властивостей нанокompозитів у якості матеріалу резервуарів зберігання рідких вуглеводнів.....	244
5.4. Дослідження залежності міцносних характеристик нанокompозитних матеріалів від способу розміщення вуглецевих нанонаповнювачів та заповнення матриці включеннями.....	256
5.5. Метод покращення механічних властивостей матеріалів резервуарів для зберігання рідких вуглеводнів.....	263
5.6. Розробка моделі підвищення міцносних характеристик корпусу резервуару за рахунок використання нанокompозитів	271
5.7. Оцінка адекватності математичної моделі фактичним даним досліджень власних частот гідропружних коливань оболонки для типового резервуару зберігання рідких вуглеводнів.....	276

РОЗДІЛ 6

РОЗРОБКА СИСТЕМНОГО ПІДХОДУ ДО ОЦІНКИ ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ ВІД ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗБЕРІГАННЯ РІДКИХ ВУГЛЕВОДНІВ В РЕЗЕРВУАРАХ ПРИ СЕЙСМІЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

6.1. Підходи до зниження техногенного впливу на довкілля резервуарів зберігання рідких вуглеводнів	279
6.2. Системний підхід до управління факторами, що підсилюють сейсмічну небезпеку в місцях розташування резервуарів зберігання рідких вуглеводнів	282
6.3. Наукові засади моніторингу стану екологічної небезпеки сейсмічних навантажень на резервуари зберігання рідких вуглеводнів	285
6.5. Проект комплексу заходів щодо забезпечення екологічної безпеки резервуарів зберігання рідких вуглеводнів	290
6.7. Класифікація факторів впливу на умови експлуатації резервуарів із врахуванням природних і техногенних впливів.....	291
6.8. Створення системи управління рівнем екологічної безпеки резервуарів зберігання рідких вуглеводнів	299
6.9. Рекомендації щодо природоохоронних заходів на територіях розташування резервуарів	306
ВИСНОВКИ	308

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .. Помилка! Закладку не визначено.

ДОДАТКИ.....	310
Додаток А.....	339
Додаток Б.....	348

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

РЗРВ – резервуар зберігання рідких вуглеводнів

НДС – напружено-деформований стан

ДБН – державні будівельні нормативи

МГЕ – метод граничних елементів

МСЕ – метод скінченних елементів

РГВ – рівень ґрунтових вод

РЗОЛР – резервуари для зберігання отруйних та легкозаймистих рідин

ВСТУП

За дослідженням, питання забезпечення екологічної безпеки при експлуатації резервуарів зберігання рідких вуглеводнів залишаються одними з найважливіших технологічних, екологічних та економічних завдань сучасного суспільства. За даними екологічного моніторингу, що свідчать про те, що за останні 5 років в Україні зросла кількість аварійних ситуацій, пов'язаних з експлуатацією резервуарів для зберігання рідких вуглеводнів, особливо в сейсмічно активних регіонах. Причиною цього негативного явища є наявні чинники в технічній, економічній, правовій та екологічній сферах, що сприяють виникненню екологічних ризиків та ін.

Проведені дослідження свідчать, що з кожним роком зростає ризик техногенних аварій, спричинених сейсмічними навантаженнями на резервуари зберігання рідких вуглеводнів. Це зумовлено як збільшенням віку та зношеності існуючих резервуарів, так і недостатньою адаптацією технологій будівництва та експлуатації до сучасних вимог сейсмічної стійкості. Слід наголосити, що зростання інтенсивності сейсмічних явищ, викликане як природними процесами, так і антропогенними факторами, вимагає негайного перегляду підходів до забезпечення безпеки таких об'єктів. На сучасному етапі виникає необхідність у впровадженні новітніх технологій та методів для підвищення рівня екологічної безпеки експлуатації резервуарів у сейсмічно небезпечних зонах.

Протягом останніх восьми років (2014–2021 рр.) спостерігається тенденція зростання кількості техногенних аварій, пов'язаних із сейсмічними навантаженнями на резервуари. За статистичними даними, близько 60% таких аварій припадає на регіони з підвищеною сейсмічною активністю. Це вказує на суспільну небезпеку такої негативної тенденції у сучасному розвитку держави та необхідність вжиття ефективних заходів для її подолання.

Задачі, що стоять перед нафто- та газовидобувними підприємствами, а також перед державними органами, обумовлюють необхідність використання та вдосконалення існуючих технологій, а також запровадження нових форм та методів забезпечення сейсмостійкості резервуарів. Зокрема, актуальними стають питання підвищення ефективності моніторингу та прогнозування технічного

стану резервуарів, розробки та впровадження сучасних систем діагностики та прогнозування їх поведінки під час сейсмічних впливів.

Вказаний напрям має низку проблем, які комплексно, на монографічному рівні щодо теоретичних та експериментальних досліджень підвищення рівня екологічної безпеки експлуатації резервуарів при сейсмічних навантаженнях, ще у науці не вирішувались. Залишаються недостатньо дослідженими теоретичні та практичні проблеми експлуатації резервуарів з урахуванням сейсмічних впливів, питання організації моніторингу та контролю їх технічного стану. У зв'язку з цим, проведення комплексного аналізу системи забезпечення екологічної безпеки експлуатації резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях, є актуальним науковим завданням. Ця проблема набуває ознак інтегрованої, міждисциплінарної наукової категорії.

З метою дослідження теоретичних засад та прикладної спрямованості щодо підвищення рівня екологічної безпеки експлуатації резервуарів при сейсмічних навантаженнях були визначені наступні завдання: аналіз сучасного стану проблеми та визначення основних напрямів її вирішення; дослідження впливу сейсмічних навантажень на резервуари та розробка моделей їх поведінки; оцінка ефективності існуючих методів забезпечення сейсмостійкості та розробка нових інженерних рішень; удосконалення методів моніторингу та діагностики технічного стану резервуарів і розробка пропозицій щодо вдосконалення досліджуваного напрямку. У зв'язку зі стрімким розвитком технологій та зростанням ризиків техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів в умовах сейсмічних навантажень, авторкою було прийнято рішення про проведення комплексного дослідження та підготовку монографії, яка б узагальнила сучасний стан проблеми та запропонувала шляхи її вирішення.

Підсумком проведеного монографічного дослідження стали нові пропозиції та рекомендації щодо зниження техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів в умовах сейсмічних навантажень, а також розроблена Концепція, яка визначає основні принципи державної політики в Україні щодо зниження техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів в умовах сейсмічних навантажень і напрям подальшого розвитку державної системи екологічної безпеки в Україні.

Авторка

РОЗДІЛ 1.

СТАН ПИТАННЯ, ПОВ'ЯЗАНИЙ З ТЕХНОГЕННИМ ВПЛИВОМ НА ДОВКІЛЛЯ ВІД ПРОЦЕСУ ЗБЕРІГАННЯ РІДКИХ ВУГЛЕВОДНІВ В РЕЗЕРВУАРАХ ПРИ СЕЙСМІЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

1.1. Аналіз сейсмічних навантажень на території України

Загалом від прямого впливу небезпечних сейсмічних подій може постраждати до 40% території України, а від спільного впливу землетрусів із підтопленнями, зсувами, просадками та іншими інженерно-геологічними процесами, що негативно впливають на стійкість конструкцій. Сейсмічні райони України з прогнозованою інтенсивністю сейсмічних поштовхів 6-9 балів займають близько 20 % території (≈ 120 тис. км²), де проживає понад 10 млн осіб. Території з інтенсивністю 7-9 балів займають близько 12 % території і включають близько 80 населених пунктів, в яких проживає понад 7 млн осіб¹.

Сейсмічність території України визначається місцевими землетрусами і сильними підкоровими землетрусами унікальної зони Вранча (Румунія) – унікальної, тому що таких високоактивних зон з потужними глибокими землетрусами на нашій планеті є лише три:

¹ Yatsyshyn T., Polutrenko M., Poberezhny L., Maruschak P., Martynyuk R. Assessment of factors of technogenic and environmental risks at particular stages of the life cycle of oil and gas wells. *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 36. P. 362-369. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.047> [1]; Tang L., Zhang M., Wen L. Support vector machine classification of seismic events in the Tianshan orogenic belt. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2020. 125. e2019JB018132. <https://doi.org/10.1029/2019JB018132> [2]; Kendzera O.V., Mykulyak S.V., Semenova Yu.V., Skurativska I.A., Skurativskiy S.I.. Assessment of seismic response of a soil layer with the oscillating inclusions. *Geophysical journal*. 2020. Vol. 42 (4). P. 47–58 [3]; Kendzera O.V., Mykulyak S.V., Semenova Yu.V., Skurativska I.A., Skurativskiy S.I.. Seismic response of a layered soil deposit with inclusions. *Geophysical journal*. 2021. Vol. 43 (2). P. 3–13 [4].

Вранча, Гіндукуш і острови Тонга. Інтенсивність сейсмічних струшувань від землетрусів зони Вранча з $M > 7$ на території України становить від 3 до 8 балів за шкалою MSK-64. Найсильніші струшування були спричинені румунськими землетрусами 1230, 1790, 1802, 1838, 1908, 1940, 1977, 1986 і 1990 років. Упродовж XX ст. у зоні Вранча сталося 30 землетрусів магнітудою 6,5 і вище, найпотужніші з них відбулися 10 листопада 1940 р. (магнітудою 7,4) та 4 березня 1977 р. (магнітудою 7,5). Лише за останні пів року у зоні Вранча було зафіксовано кілька землетрусів (Рисунок 1.1.): 3 листопада 2022 р. ($M = 5,2$, глибина 140 км), 17 грудня 2022 р. ($M = 5,4$, глибина 143 км), 6 лютого 2023 р. ($M = 4,6$, глибина 23 км), 14 лютого 2023 р. ($M = 5,7$, глибина 10 км), 12 березня 2023 р. ($M = 4,1$, глибина 140 км).

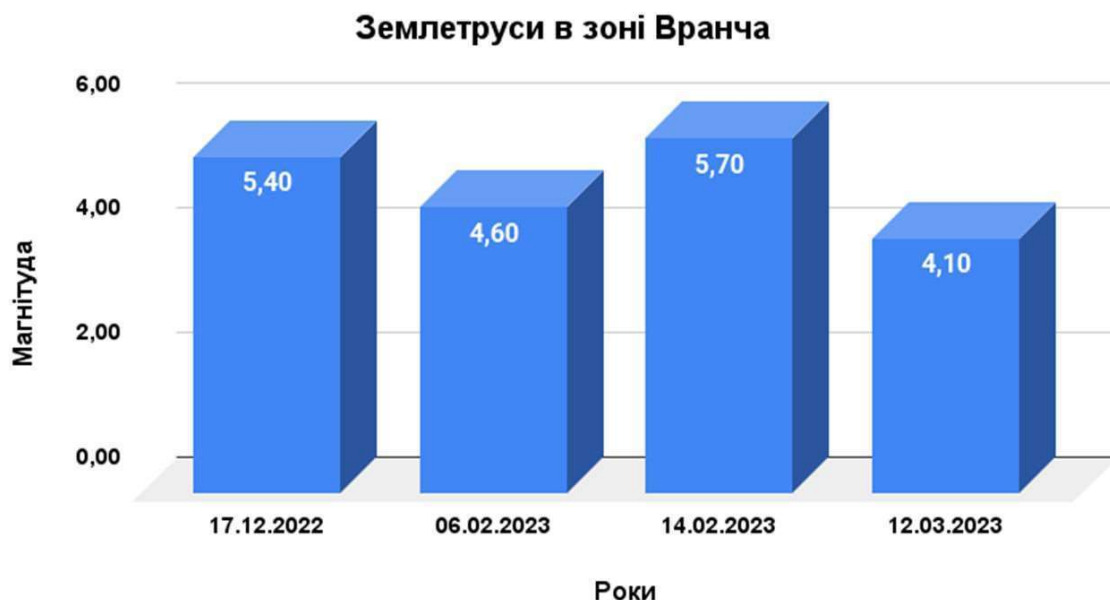
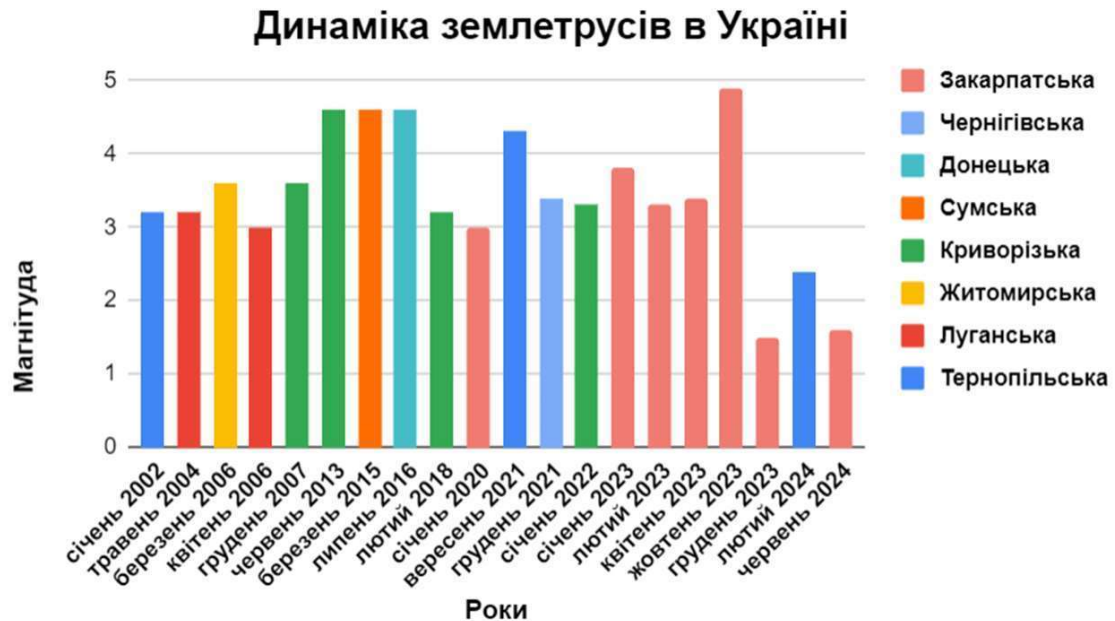


Рисунок 1.1 – Землетруси в зоні Вранча

Деякі з найсильніших таких землетрусів сталися 23 червня 2013 р. у м. Кривий Ріг ($M = 4,6$); 3 лютого 2015 р. у Полтавській обл. ($M = 4,6$); 7 липня 2016 р. на Донеччині ($M = 4,6$); 20 лютого 2018 р. у м. Кривий Ріг ($M = 3,2$); 7 грудня 2021 р. у Чернігівській обл. ($M = 3,4$); 21 січня 2022 р. у м. Кривий Ріг ($M = 3,3$) (Рисунок 1.2.)².

² Gryn D. M. Seismic hazard of the territory of Ukraine. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2023. Vol. (6). P. 25–33. URL: <https://doi.org/10.15407/visn2023.06.025> [5].

Отже, найбільшу небезпеку для населення, промисловості, інфраструктури практично на всій території України становлять



підкорові землетруси сейсмоактивної зони Вранча, але не менш загрозливими є локальні неглибокі землетруси Криму, Закарпаття і Передкарпаття. Щороку фіксується близько 70–100 таких подій.

Рисунок 1.2 – Динаміка землетрусів в Україні

Особливої гостроти в останні роки набуває проблема слабосейсмічних і несейсмічних територій, схильних до техногенних землетрусів, викликаних підземними вибухами, видобутком корисних копалин і антропогенними впливами. Основними факторами природно-техногенної сейсмічної обстановки територій міст та інших населених пунктів є складна структурно-тектонічна та геолого-літологічна будова територій, розвиток небезпечних геологічних процесів. При цьому, питання, пов'язані з прогнозом активізації (розвитку) небезпечних геологічних процесів і зміни інженерно-геологічних і сейсмічних властивостей ґрунтів в результаті техногенного впливу, залишаються недостатньо дослідженими. Розвиток міст та техногенний вплив на навколишнє середовище сприяють збільшенню водоспоживання, зростанню обсягів промислового і міського будівництва, зміні природних русел річок, створенню водосховищ, розвитку процесів підтоплення, що, в свою чергу, може викликати

виникнення та підвищення сейсмічної небезпеки техногенного походження для промислових та житлових будівель, для екологічно небезпечних техногенних об'єктів.

За результатами нещодавніх сейсмологічних досліджень³ встановлено, що на території України, в т. ч. і на платформній її частині, існує небезпека місцевих і сильних підкорових землетрусів з магнітудою понад 5 (більше 6 балів за шкалою MSK-64).

Фактор зовнішнього техногенного сейсмічного впливу підвищує імовірність природно-антропогенних землетрусів на родовищах. Таким чином, припустимо, що на території Полтавщини є висока вірогідність виникнення надзвичайних ситуацій екологічного характеру, спричинених дією зовнішніх та внутрішніх чинників техногенної сейсмічності на об'єкти нафтогазового комплексу. Слід також звернути увагу на той факт, що на відміну від природних землетрусів, періоди ініціювання сейсмопровокуючих техногенних коливань зовнішніми джерелами (як-то, вибухи на кар'єрах) складають не десятки років, а декілька діб, тижнів. Таким чином, геологічне середовище в зонах розташування об'єктів нафтогазового комплексу знаходиться під постійним впливом техногенних землетрусів, інтенсивність яких може складати до 4 балів на відстані до 5 км від кар'єра та до 2 балів на відстані до 12 км від кар'єра⁴.

Проблематика техногенного навантаження на навколишнє природне середовище від резервуарів для зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях є ключовим питанням

³ Kendzera O. V., Mykulyak S. V., Semenova Yu. V., Skurativska I. A., Skurativskyi S. I. Assessment of seismic response of a soil layer with the oscillating inclusions. *Geophysical journal*. 2020. Vol. 42 (4). P. 47–58 [3]; Kendzera O. V., Mykulyak S. V., Semenova Yu. V., Skurativska I. A., Skurativskyi S. I. Seismic response of a layered soil deposit with inclusions. *Geophysical journal*. 2021. Vol. 43 (2). P. 3–13 [4]; Кендзера О. В., Пигулевский П. Г., Андрущенко Ю. А. Особливості сейсмічності території Кривбасу. Доп. НАН України. 2021. № 6. С. 87–96. URL: <https://doi.org/10.15407/dopovidy.2021.06.087> [6].

⁴ Онищенко В. О., Винников Ю. Л., Зоценко М. Л., Харченко М. О., Ларцева І. І., Бредун В. І., Нестеренко Т. М. Ефективні конструктивно-технологічні рішення об'єктів зберігання нафти і нафтопродуктів у складних інженерно-геологічних умовах : монографія. Полтава : ФОП Пусан А. Ф. 2019. 233 с. [7].

екологічної безпеки та сталого розвитку промислових територій як на території України, так і за її межами⁵.

Вивченням проблем сейсмічної небезпеки в Україні займалися такі вчені Кендзера О. В., Андрущенко Ю. А., Гордієнко Ю. О., Каплаушенко В. М.⁶, Щербина С. В., Пігулевський П. Г.⁷, за кордоном

⁵ Гордієнко Ю. О., Каплаушенко В. М. Сучасні інформаційно-комп'ютерні технології та мережа сейсмічних спостережень ГЦСК щодо упередження максимального сейсмічного ефекту від землетрусу в ближній зоні. *Вісник ЖДТУ. Сер. «Технічні науки»*. 2017. № 3 (38). С. 61–71. URL: [https://doi.org/10.26642/tn-2006-3\(38\)-61-71](https://doi.org/10.26642/tn-2006-3(38)-61-71) [8].; ДБН В.1.1-12:2014 Будівництво у сейсмічних районах України. Київ: Мінрегіонбуд України, 2014. 110 с. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-1083#load>. [9].

⁶ Kendzera O. V., Mykulyak S. V., Semenova Yu. V., Skurativska I. A., Skurativskiy S. I. Assessment of seismic response of a soil layer with the oscillating inclusions. *Geophysical journal*. 2020. Vol. 42 (4). P. 47–58 [3]; Kendzera O. V., Mykulyak S. V., Semenova Yu. V., Skurativska I. A., Skurativskiy S. I. Seismic response of a layered soil deposit with inclusions. *Geophysical journal*. 2021. Vol. 43 (2). P. 3–13 [4]; Кендзера О. В., Пігулевський П. Г., Андрущенко Ю. А. Особливості сейсмічності території Кривбасу. Доп. НАН України. 2021. № 6. С. 87–96. URL: <https://doi.org/10.15407/dopovid12021.06.087> [6]; Гордієнко Ю. О., Каплаушенко В. М. Сучасні інформаційно-комп'ютерні технології та мережа сейсмічних спостережень ГЦСК щодо упередження максимального сейсмічного ефекту від землетрусу в ближній зоні. *Вісник ЖДТУ. Сер. «Технічні науки»*. 2017. № 3 (38). С. 61–71. URL: [https://doi.org/10.26642/tn-2006-3\(38\)-61-71](https://doi.org/10.26642/tn-2006-3(38)-61-71) [8].

⁷ Щербина С. В., Пігулевський П. Г., Гурова І. Ю., Амашукелі Т. А., Шумлянська Л. О., Калініченко О. А., Калітова І. А., Малицький Д. В., Нікулін В. Г., Вербицький С. Т. Сейсмічні події і тектоніка Кривбасу. *Геофиз. журн*. 2021. Т. 43. № 6. С. 248–265. URL: <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i6.251566> [10]; Nahorni V., Pigulevskiy P., Svystun V., Shumlianska L. To the question of verification of forecasting methods of earthquakes. *Extended Abstracts of XIV Int. Sci. Conf. «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment»*. (10–13 November 2020, Kyiv). 2020. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056080> [11]; Pihulevskiy P. G., Anisimova L. B., Kalinichenko O. O., Panteleeva N. B., Hanchuk O. V. Analysis of natural and technogenic factors on the seismicity of Kryvyi Rih. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1840(1), 012018. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1840/1/012018> [12]; Pihulevskiy P. H., Kendzera O. V., Babiy K. V., Anisimova L. B., Kyryliuk O. S. Connection of Kryvbas tectonics with natural and technogenic seismicity. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. Vol. (2), P. 5–10 [13].

Li Y., Chen X., Sesetyan K., Stucchi M., Yoshida N., Salzano E., Dai Z., Moein M.J.A. ⁸та інші⁹.

⁸ Li Y., Chen X., Chen L. The Earth's Rotation-Related Seismicity as a Precursor to the 2023 Mw 7.8 Gaziantep, Turkey Earthquake. Preprints. 2023. 2023080209. URL: <https://doi.org/10.20944/preprints202308.0209.v1> [14]; Sesetyan K., Stucchi M., Castelli V., Gomez Capera A. A. Kahramanmaras – Gaziantep Türkiye M7.7 Earthquake, 6 February 2023 (04:17 GMT+03:00). Large historical earthquakes of the earthquake-affected region: a preliminary report. *INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Italy*. 2023. Retrieved from URL: <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/en/> [15]; Yoshida N. Seismic Ground Response Analysis. *Dordrecht: Springer*. 2014. 365 p. URL: <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9460-2> [16]; Salzano E., Iervolino I., Fabbrocino G. Seismic risk of atmospheric storage tanks in the framework of quantitative risk analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2003. Vol. 16, Is. 5. P. 403-409. URL: [https://doi.org/10.1016/S0950-4230\(03\)00052-4](https://doi.org/10.1016/S0950-4230(03)00052-4) [17]; Dai Z., Qiao H., Hao X., Wang Y., Lei H., Cui Z. Influence of Heterogeneous Foundation on the Safety of Inverted Cone Bottom Oil Storage Tanks under Earthquakes. *Buildings*. 2023. Vol. 13. 1720. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings13071720> [18].; Moein M.J.A., Langenbruch C., Schultz R. *et al.* The physical mechanisms of induced earthquakes. *Nat Rev Earth Environ*. 2023. Vol. 4. P. 847–863. URL: <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00497-8> [19].

⁹ Зоценко М. Л., Винников Ю. Л., Харченко М. О., Ларцева І. І. Забезпечення надійної експлуатації нафтових резервуарів у складних геотехнічних умовах при сейсмічних впливах. *Проблеми та перспективи нафтогазової промисловості*. 2018. Вип. 2. С. 65-90. URL: <https://doi.org/10.32822/naftogazscience.2018.02.065> [20]; Zang Q., Liu J., Lu L., Lin G. A. NURBS-based isogeometric boundary element method for analysis of liquid sloshing in axisymmetric tanks with various porous baffles. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*. 2020. Vol. 81. P. 129-150 [21]; Strelnikova E., Kriutchenko D., Gnitko V., Degtyarev K. Boundary element method in nonlinear sloshing analysis for shells of revolution under longitudinal excitations. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2020. Vol. 111. P. 78-87. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2019.10.008> [22]; Sierikova O., Strelnikova E., Gnitko V., Degtyarev K. Boundary Calculation Models for Elastic Properties Clarification of Three-dimensional Nanocomposites Based on the Combination of Finite and Boundary Element Methods. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2021. P. 351-356, DOI: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570086 [23]; Gnitko V., Marchenko U., Naumenko V., Strelnikova E. Forced vibrations of tanks partially filled with the liquid under seismic load. *WIT Transaction on Modelling and Simulation*. 2011. Vol. 52. P. 285-296. URL: <https://doi.org/10.2495/BE110251> [24]; Sadek S. A., Gomaa M. S.,

Проблемні питання будівництва та експлуатації нафтових вертикальних сталевих резервуарів у складних геотехнічних умовах (просадочні і заторфовані ґрунти, мули, насипні, намівні ґрунти, підтоплені території), у т. ч. на сейсмічно небезпечних територіях досліджував Зоценко М. Л.¹⁰.

Щербина С. В., Пігулевський П. Г., Гурова І. Ю. та інші розглядали у своїх дослідженнях землетруси природного і техногенного походження¹¹.

Кендзера О. В., Пігулевський П. Г. та Андрущенко Ю. А. розглядали в своїх роботах промислові вибухи з магнітудою >1,0. Магнітуда найбільш потужних вибухів, проведених в 2011–2020 рр. у кар'єрах і шахтах

El-Ghazaly H. A. Seismic Behavior of Ground Rested Rectangular RC Tank Considering Fluid- Structure- Soil Interaction. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2019. Vol 16(1). P. 01-15. URL: <https://doi.org/10.9790/1684-1601010115> [25]; Kijko A., Vermeulen P. J, Smit A. Estimation Techniques for Seismic Recurrence Parameters for Incomplete Catalogues. *Surv Geophys*. 2022. Vol. 43. P. 597–617. URL: <https://doi.org/10.1007/s10712-021-09672-2> [26]; Payyappilly L., Reddy K. S., Karthik K., Somala S. N. Impact of directivity on seismic risk assessment: rupture distance, component and propagation length. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2021. Vol. 22. URL: <https://doi.org/10.1007/s42107-021-00388-7> [27].

¹⁰ Зоценко М. Л., Винников Ю. Л., Харченко М. О., Ларцева І. І. Забезпечення надійної експлуатації нафтових резервуарів у складних геотехнічних умовах при сейсмічних впливах. *Проблеми та перспективи нафтогазової промисловості*. 2018. Вип. 2. С. 65-90. URL: <https://doi.org/10.32822/naftogazscience.2018.02.065> [20].

¹¹ Щербина С. В., Пігулевський П. Г., Гурова І. Ю., Амашукелі Т. А., Шумлянська Л. О., Калініченко О. А., Калітова І. А., Малицький Д. В., Нікулін В. Г., Вербицький С. Т. Сейсмічні події і тектоніка Кривбасу. *Геофиз. журн*. 2021. Т. 43. № 6. С. 248–265. URL: <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i6.251566> [10]; Nahorni V., Pigulevskiy P., Svystun V., Shumlianska L. To the question of verification of forecasting methods of earthquakes. *Extended Abstracts of XIV Int. Sci. Conf. «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment»*. (10–13 November 2020, Kyiv). 2020. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056080> [11]; Pihulevskiy P. G., Anisimova L. B., Kalinichenko O. O., Panteleeva N. B., Hanchuk O. V. Analysis of natural and technogenic factors on the seismicity of Kryvyi Rih. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1840(1), 012018. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1840/1/012018> [12]; Pihulevskiy P. H., Kendzera O. V., Babiy K. V., Anisimova L. B., Kyryliuk O. S. Connection of Kryvbas tectonics with natural and technogenic seismicity. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. Vol. (2), P. 5–10 [13].

Криворізького залізорудного басейну, знаходилась в інтервалі значень 2,7–3,5. Було також досліджено, що із збільшенням кількості техногенних сейсмічних подій почала зростати і кількість природних землетрусів, які відбувалися зі спусковим (тригерним) запізненням¹².

Фізичні механізми індукованої сейсмічності та їх фундаментальне застосування для моделювання, прогнозування, моніторингу та пом'якшення індукованих землетрусів досліджували Moein, M.J.A., Langenbruch, C., Schultz, R. et al.¹³.

Дослідження впливу сейсмічних навантажень на стан резервуарів зберігання різних рідин та їх пошкодження були проведені Marta D'Amico¹⁴.

Аналіз світового та вітчизняного досвіду використання різних методів щодо зниження динамічного і вібраційного впливу на слабкі, водонасичені, структурно-нестійкі ґрунти показав, що найбільш ефективним засобом для їх штучного перетворення є цементація за допомогою струминної чи бурозмішувальної технологій¹⁵.

1.2. Аналіз невизначеності сейсмічної небезпеки

Як правило, паливні баки і резервуари працюють при високих експлуатаційних навантаженнях і містять агресивні або легкозаймисті наповнювачі. Ємності для зберігання рідин є важливими компонентами рятувальних і промислових об'єктів. При інтенсивних силових впливах або раптово прикладених навантаженнях на цих водоймах

¹² Кендзера О. В., Пигулевский П. Г., Андрущенко Ю. А. Особливості сейсмічності території Кривбасу. Доп. НАН України. 2021. № 6. С. 87–96. URL: <https://doi.org/10.15407/dopovid12021.06.087> [6].

¹³ Moein M.J.A., Langenbruch C., Schultz R. et al. The physical mechanisms of induced earthquakes. *Nat Rev Earth Environ*. 2023. Vol. 4. P. 847–863. URL: <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00497-8> [19].

¹⁴ D'Amico M. Seismic fragility and dynamic behavior of atmospheric cylindrical steel tanks. [Dissertation thesis]. Alma Mater Studiorum Università di Bologna. Dottorato di ricerca in Ingegneria civile, chimica, ambientale e dei materiali, 30 Ciclo. 2018. URL: <https://doi.org/10.6092/unibo/amsdottorato/8660> [28].

¹⁵ Зоценко М. Л., Винников Ю. Л., Харченко М. О., Ларцева І. І. Забезпечення надійної експлуатації нафтових резервуарів у складних геотехнічних умовах при сейсмічних впливах. *Проблеми та перспективи нафтогазової промисловості*. 2018. Вип. 2. С. 65-90. URL: <https://doi.org/10.32822/naftogazscience.2018.02.065> [20].

спостерігається явище плескання¹⁶.

Неадекватно спроектовані резервуари зазнали великої шкоди під час минулих землетрусів, що призвело до катастрофічних наслідків. На перших етапах ризику, пов'язані із землетрусами, оцінювали за допомогою детермінованого аналізу сейсмічної небезпеки (DSHA)¹⁷. Але DSHA не надає інформації про ймовірність контрольного землетрусу та наслідків невизначеності. За останні 20 років використання імовірнісних концепцій дозволило оцінити невизначеності в розмірах, місцях, частотах, характеристиках руху ґрунту в сейсмічних небезпеках¹⁸.

Глибше розуміння невизначеності сейсмічної небезпеки було пов'язане з використанням понять інтервальної ймовірності¹⁹. У цьому підході розподіли можливостей були застосовані для визначення менших і вищих ймовірностей (міри необхідності та можливості). Цей підхід використовується в аналізі сейсмічної небезпеки протягом тривалого часу. Природним розширенням інтервальної ймовірності є поняття нечіткої ймовірності. Концепції нечіткого параметра та нечіткої

¹⁶ Zang Q., Liu J., Lu L., Lin G. A. NURBS-based isogeometric boundary element method for analysis of liquid sloshing in axisymmetric tanks with various porous baffles. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*. 2020. Vol. 81. P. 129-150 [21].

¹⁷ Gnitko V., Marchenko U., Naumenko V., Strelnikova E. Forced vibrations of tanks partially filled with the liquid under seismic load. *WIT Transaction on Modelling and Simulation*. 2011. Vol. 52. P. 285-296. URL: <https://doi.org/10.2495/BE110251> [24]; Sadek S. A., Goma M. S., El-Ghazaly H. A. Seismic Behavior of Ground Rested Rectangular RC Tank Considering Fluid- Structure- Soil Interaction. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2019. Vol 16(1). P. 01-15. URL: <https://doi.org/10.9790/1684-1601010115> [25].

¹⁸ Kijko A., Vermeulen P.J, Smit A. Estimation Techniques for Seismic Recurrence Parameters for Incomplete Catalogues. *Surv Geophys*. 2022. Vol. 43. P. 597–617. URL: <https://doi.org/10.1007/s10712-021-09672-2> [26]; Payyappilly L., Reddy K. S., Karthik K., Somala S. N. Impact of directivity on seismic risk assessment: rupture distance, component and propagation length. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2021. Vol. 22. URL: <https://doi.org/10.1007/s42107-021-00388-7> [27].

¹⁹ Akkar S., Moghimi S., Arici Y. A study on major seismological and fault-site parameters affecting near-fault directivity ground-motion demands for strike-slip faulting for their possible inclusion in seismic design codes. *Soil Dyn Earthq Eng*. 2018. Vol. 104. P. 88–105 [31]; Kramer S. L. *Geotechnical Earthquake Engineering*. New Jersey: Prentice Hall, Upper Saddle River. 1996. 672 p [32].

логіки вперше були запропоновані Заде в²⁰, і з того часу вони стали потужним інструментом для моделювання невизначеностей у різноманітних практичних інженерних питаннях²¹. Слід зазначити, що для такого математичного моделювання необхідна реалізація нечітких диференціальних рівнянь.

Багато авторів присвятили свої дослідження чисельній реалізації нечітких диференціальних рівнянь²².

Невизначеності, пов'язані з моделюванням коливань конструкції під дією сейсмічних навантажень, викликають занепокоєння вчених у всьому світі²³. Дослідники та інженери демонструють підходи до аналізу сейсмічних навантажень і стійкості конструкції за допомогою методів нечіткого аналізу, використовуючи поняття нечіткої інтенсивності землетрусів, нечітких періодів землетрусів, нечіткого демпфування, нечітких епіцентральної відстаней між локальними об'єктами та потенційними сейсмічними джерелами та інших основних понять²⁴. На перших етапах були задіяні детерміновані методи оцінки міцнісних динамічних характеристик конструкцій за сейсмічних та ударних навантажень²⁵. Одним із способів боротьби з невизначеністю є

²⁰ Zadeh L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965. Vol.8. P. 338-353 [33].

²¹ Andrić J., Lu D.-G. Seismic hazard analysis based on fuzzy-probabilistic approach. *6th ECCOMAS Thematic Conf. on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering* M. Papadrakakis, M. Fragiadakis (eds.), (Greece, 15–17 June, 2017). 2017. URL: <https://doi.org/10.7712/120117.5739.17539> [34].

²² Ahmadiani A., Salahgshour S., Chan C., Baleanu D. Numerical solution of fuzzy differential equations by an efficient Runge-Kutta method with generalized differentiability. *Fuzzy Set Syst.* 2018. Vol.331. P. 47-67 [35].

²³ Afsari N., Abdipour M., Fataneh T.-F. Seismic Hazard Analysis from Deterministic Method Using Fuzzy Logic in Anzali Port. *Earth Science Inform.* 2022. Vol. 15. URL: <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00742-y> [36].

²⁴ Smetankina N., Kravchenko I., Merculov V., Ivchenko D., Malykhina A. Modelling of bird strike on an aircraft glazing. In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Kritskiy, D. (eds) *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, Cham. 2020. Vol. 1113. P. 289–297. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5_25 [37].

²⁵ Yershov S., Rusanov A., Gardzilewicz A., Lampart P. Calculations of 3D viscous compressible turbomachinery flows. In: *Proc. 2nd Symp. on Comp. Technologies for Fluid/Thermal/Chemical Systems with Industrial*

додавання випадковості деяким параметрам моделі за допомогою реалізації нечітких стохастичних диференціальних рівнянь²⁶.

1.3. Аналіз проявів техногенних землетрусів на території України

Індуковані землетруси в основному викликані збуреннями напруги, які дестабілізують вже існуючі критично напружені розломи. Однак промислові операції також можуть повторно активувати несправності, які спочатку не були серйозно напружені.

Основним механізмом запуску сейсмічності, спричиненої ін'єкцією, є дифузія порового тиску, яка зменшує нормальне напруження, що діє на тріщини та площини розломів. Основним механізмом сейсмічності, викликаній видобутком, є поропружність, яка впливає на поле напруги в навколишніх гірських утвореннях і може викликати землетруси.

Виникнення землетрусів великої магнітуди підтверджує гіпотезу про те, що максимальна магнітуда землетрусу, ймовірно, контролюється регіональною тектонікою. Зокрема, у сейсмічно активних регіонах тектонічне джерело деформації часто контролює ступінь розриву на критично напружених розломах.

Об'єм впорскування рідини не є єдиним контрольним параметром максимальної магнітуди землетрусу, і інші фактори, такі як час, що минув від початку вилучення або впорскування рідини (час ініціювання), можуть мати значну роль. Час спрацьовування, ймовірно, пов'язаний з часом, необхідним для збурення напруги або сили вже існуючих несправностей.

Точні оцінки максимальної величини можуть бути корисними, коли є перелік існуючих критично напружених розломів, детальна інформація про напругу на місці та фізичне розуміння процесів, які контролюють динаміку розриву.

Applications. ASME PVP Division Conf. (Boston, 1-5 August 1999). PVP. 1999. Vol. 397(2). P. 143-154 [38].

²⁶ Wang Z. W., Ge N., Li C. W. Structural Vibration Mode Fuzzy Control Based on BPNeural Network Algorithm. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*. 2020. Vol 50. Is. 243(05). P. 17-23 [39].

Експерименти в підземних лабораторіях *in situ* з широкими системами моніторингу та добре охарактеризованою гірською масою дають унікальну можливість перевірити методологічні досягнення в управлінні сейсмічністю та ефективність чисельних моделей для вирішення пов'язаних процесів²⁷.

Користуючись базою даних землетрусів, спричинених людиною, HiQuake²⁸, що є вичерпним ресурсом про послідовності землетрусів, які вважають спричиненими антропогенною діяльністю, що містить понад 700 справ, що охоплюють період 1868–2016 років, було досліджено причини техногенних землетрусів.

Загалом самі землетруси не пов'язані безпосередньо з глобальним потеплінням або нестійкою діяльністю людини, але є непрямі способи, за допомогою яких людська діяльність може впливати на ймовірність і наслідки землетрусів. Індукована сейсмічність, що виникає внаслідок таких видів діяльності, як видобуток корисних копалин, видобуток геотермальної енергії, сейсмічність, спричинена водосховищем (через велике заповнення водосховищ або будівництво греблі), а також гідравлічний розрив (розрив пласта), може змінити підповерхневий тиск і напругу, потенційно спровокувавши землетруси в регіонах, які б не природно відчувати їх.

Нераціональна практика землекористування, включаючи урбанізацію та вирубку лісів, може підвищити вразливість регіонів до небезпек, пов'язаних із землетрусами та повеннями, оскільки будівництво будівель та інфраструктури на нестабільному ґрунті може збільшити збитки та жертви під час таких катастрофічних подій. Крім того, зміна клімату, хоча й не пов'язана безпосередньо із землетрусами, може впливати на земну кору, наприклад танення льодовиків, зменшуючи тиск на земну кору та призводячи до підняття, відомого як льодовикова ізостатична корекція, впливаючи на сейсмічну активність у вибраних регіонах. Нестійкі практики, такі як надмірний видобуток ґрунтових вод або зміни рівня резервуарів, також можуть змінити підповерхневі умови, потенційно впливаючи на сприйнятливність територій до сейсмічної небезпеки (Рисунок 1.3.).

²⁷ Moein M.J.A., Langenbruch C., Schultz R. *et al.* The physical mechanisms of induced earthquakes. *Nat Rev Earth Environ.* 2023. Vol. 4. P. 847–863. URL: <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00497-8> [19].

²⁸ Foulger G. R., Wilson M. P., Gluyas J. G., Julian B. R., Davies R. J. Global review of human-induced earthquakes. *Earth Sci. Rev.* 2018. Vol. 178. P. 438–514 [40].

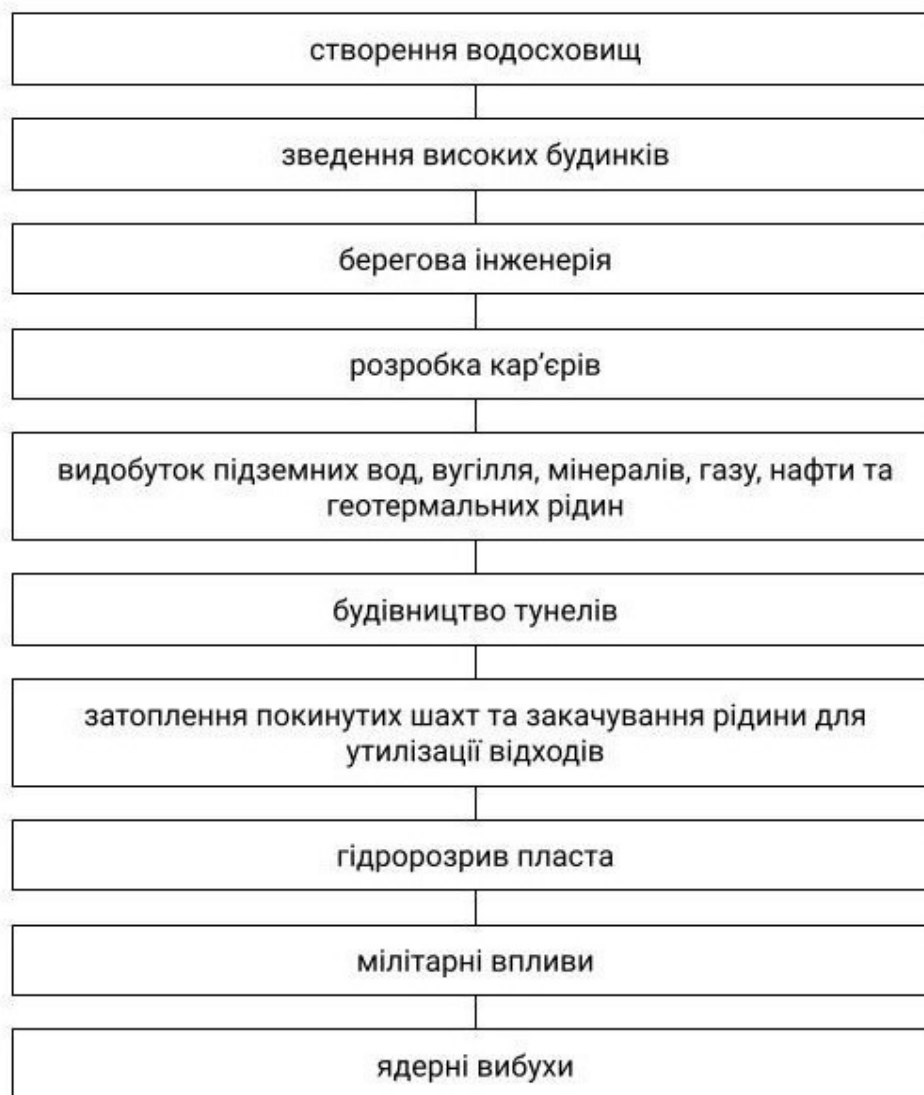


Рисунок 1.3 – Додаткові фактори, що викликають землетруси

Створення водосховищ

У грудні 2007 року в регіоні Міла на північному сході Алжиру відбулися тисячі мікроземлетрусів ($0,8 \leq M_d \leq 3,9$), зареєстрованих вісьмома тимчасовими станціями на додаток до постійних станцій. Під час відкачування в 2007 році лише 45 % перенесеної води ($\sim 600\,000\text{ м}^3$ на добу) було відновлено в водосховищі Oued Athmania, і велика кількість води під незначним тиском витекла через дефектні з'єднання в тунелі, який проходить через Джебель. Ця вода глибоко проникла в ґрунт за допомогою вже існуючих тріщин, розломів і карстів. Через дев'ять днів після початку першого закачування місцеве підвищення

тиску порової рідини на невеликих глибинах викликало сейсмічність на південний схід від Джебель-Ахала, де розломи, ймовірно, були близькі до руйнування. Крім того, довгострокове порівняння сейсмічної активності в регіоні з рівнями води за дамбою та відкачуванням води показує, що набір землетрусів був одноразовою подією, пов'язаною з операцією відкачування²⁹.

Зведення висотних будівель

Лінь (2005) припустив, що будівництво будівлі Тайпеї 101, Тайвань, висотою ~ 500 м, вплинуло на структуру сейсмічності в безпосередній близькості від будівлі. Ця будівля вагою 7×10^8 кг збільшила навантаження на ґрунт біля основи на $\sim 0,47$ МПа. За восьмирічний період, що передував будівництву, відбулося дев'ять землетрусів з $M_L \leq 2,0$, тоді як протягом восьми років, що охоплювали будівництво та після нього, відбулося 20 землетрусів до $M 3,8$. У період будівництва землетруси були надзвичайно часті³⁰.

Берегова інженерія

Клозе (2007) припустив, що землетрус $M_L 4.2$ у 2007 році у Фолкстоуні, Кент, Великобританія, був викликаний геоінженерними методами накопичення гальки в гавані з 1806 року. Існує значна втрата прибережних земель в результаті ерозії на південний захід і північний схід від Фолкстоуна, але отримання землі шляхом штучного накопичення гальки в гавані Фолкстоун триває приблизно 200 років. За оцінками, до 2007 року накопичилося $\sim 2,8 \times 10^9$ кг, що в чотири рази перевищує масу будівлі Тайбей 101. Це змінило напругу приблизно на $0,001\text{--}0,03$ МПа на глибині 2 км. Епіцентр землетрусу знаходився на відстані ~ 1 км (похибка епіцентру ~ 5 км) від гальки та зароджувався на невеликій глибині³¹.

²⁹ Afsari N., Abdipour M., Fataneh T.-F. Seismic Hazard Analysis from Deterministic Method Using Fuzzy Logic in Anzali Port. *Earth Science Inform.* 2022. Vol. 15. URL: <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00742-y> [36].

³⁰ Foulger G. R., Wilson M. P., Gluyas J. G., Julian B. R., Davies R. J. Global review of human-induced earthquakes. *Earth Sci. Rev.* 2018. Vol. 178. P. 438–514 [40].

³¹ Klose C. D. Coastal land loss and gain as potential earthquake trigger mechanism in SCRs. *Proceedings of the Fall Meeting of the American Geophysical Union abstract T51D-0759*. (San Francisco, 10–14 December, 2007). 2007 [42].

Розробка кар'єрів

Найбільшим землетрусом, пов'язаним з розробкою кар'єрів, є подія 2013 року на Кузбасі, Сибір, магнітудою 6,1. Це сталося на Бачатському кар'єрі, який має довжину 10 км, ширину 2,2 км, глибину виїмки до 320 м і видобуток $> 9 \times 10^6$ т вугілля на рік. Землетрус зруйнував будівлі в місцевих громадах і відчувався в сусідніх провінціях³².

Видобуток підземних вод, вугілля, мінералів, газу, нафти та геотермальних рідин

Подія 2011 MW 5,1 Лорка, Іспанія, яка, як припускають, була спричинена видобутком підземних вод, завдала великої шкоди місту Лорка, серйозно пошкодивши як сучасні, так і історичні будівлі, вбивши людей. дев'ятьох осіб і кілька сотень поранених. González та ін. прийшли до висновку, що кумулятивне довгострокове гідравлічне розвантаження в поєднанні з розташуванням і типом розлому по відношенню до водоносного горизонту, що виснажується, сприяло стресовим умовам, які спричинили землетрус³³.

Інші випадки індукованої сейсмічності такого роду включають землетрус у 2015 році в Горкха, Непал потужністю 7,8 МВт, який було пов'язано з виснаженням підземних вод під Індо-Гангською рівниною на півдні³⁴.

Шахтні роботи збудовують напруги в навколишніх породах і можуть знизити деякі компоненти від початкових значень порядку 100 МПа до атмосферних (0,1 МПа). Різниця в напрузі, що виникає в результаті цього, може перевищити міцність відповідних порід і викликати землетруси. У 2007 році приблизно 102 вугільні шахти та 20 інших шахт повідомили про сейсмічність. Сім із них були пов'язані з подіями $M > 4,0$, а 27 – із подіями $M \geq 3,0$. Землетруси неглибокі, відбуваються на глибині 0–7 км. Найбільшою вуглевидобувною подією,

³² Foulger G. R., Wilson M. P., Gluyas J. G., Julian B. R., Davies R. J. Global review of human-induced earthquakes. *Earth Sci. Rev.* 2018. Vol. 178. P. 438–514 [40].

³³ González P. J., Tiampo K. F., Palano M., Cannavo F., Fernandez J. The 2011 Lorca earthquake slip distribution controlled by groundwater crustal unloading. *Nat. Geosci.* 2012. Vol. 5. P. 821-825. URL: <https://doi.org/10.1038/ngeo1610> [43].

³⁴ Kundu B., Vissa N. K., Gahalaut V. K. Influence of anthropogenic groundwater unloading in Indo-Gangetic plains on the 25 April 2015 Mw 7.8 Gorkha, Nepal earthquake *Geophys. Res. Lett.* 2015. Vol. 42. P. 10607-10613 [44].

яка сталася в Китаї, є подія ML 4.3 1977 року на шахті Taiji, Beipiao, Liaoning³⁵.

Прокладання тунелів

У 20 випадках повідомлялося про землетруси, що супроводжували розкопки тунелів і порожнин. До них відносяться розкопки для будівництва електростанцій (наприклад, підземна електростанція Pubugou, китайська гідроелектростанція), водний транспорт на гідроелектростанціях і атомних електростанціях (наприклад, гідроелектростанція Yuzixi, Китай, і атомна станція Forsmark, Швеція), а також автомобільний і залізничний транспорт (наприклад, тунель Рітсем, Швеція, і залізничний тунель Ціньлін, Китай)³⁶.

57-кілометровий базовий тунель Готард, Швейцарія, частина Нового Альпійського траверсу через Швейцарські Альпи³⁷, був розкопаний для вантажних і пасажирських залізничних перевезень у 2002–2006 роках за допомогою буріння та вибухових робіт. Три «багатофункціональні станції» (MFS) ділять тунель на п'ять секцій. У 2005–2007 роках у зв'язку з розкопками найпівденнішої станції, MFS Faudo, сталася серія із 112 землетрусів з ML від –1,0 до 2,4. Найбільша подія була лише на глибині 0,5–1,0 км і сильно відчувалася на поверхні. Порожнина станції зазнала пошкоджень, включаючи відшаровування армованих стін та викривлення підлоги на $\sim 0,5$ м. Сейсмічність корелювала просторово і в часі з розкопками станції. Точні місця розташування, отримані за допомогою щільної тимчасової сейсмічної мережі, показали, що землетруси відбувалися на такій же глибині, що й тунель. Деякі з них пов'язані з розривами каменів у тунелі невдовзі після вибуху.

³⁵ Li T., Cai M. F., Cai M. A review of mining-induced seismicity in China. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2007. Vol. 44. P. 1149-1171. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.06.002> [45].

³⁶ Tang C., Wang J. W., Zhang J. Preliminary engineering application of microseismic monitoring technique to rockburst prediction in tunneling of Jinping II project. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 2010. Vol. 3. P. 193-208 [46].

³⁷ Husen S., Kissling E., von Deschanden A. Induced seismicity during the construction of the Gotthard Base Tunnel, Switzerland: hypocenter locations and source dimensions. *J. Seismol.* 2012. Vol. 16. P. 195-213. URL: <https://doi.org/10.1007/s10950-011-9261-8> [47].

Видобуток корисних копалин є найпоширенішою причиною землетрусів, пов'язаних з видобутком, і прикладом є 267 досліджених випадків. П'ять випадків стосуються підземних вод і шість – геотермальних ресурсів. Наймасштабніші землетруси, спричинені підземним видобуванням, – це землетрус MW 7,8 Горкха, Непал, землетрус ML 6,1 Бачацький, Росія, землетрус MS 7,3 Gazli, Узбекистан і землетрус ML 6,6 Cerro Prieto, Імперська долина, Мексика³⁸.

Затоплення покинутих шахт та закачування рідини для утилізації відходів

Елсворт (2013) підкреслив зростаючу проблему землетрусів, пов'язаних із ін'єкціями, і вказав на нещодавнє різке збільшення частоти землетрусів для $M \geq 3$ подій у центральній та східній частині США. Більше 100 таких землетрусів відбувалися в середньому щорічно в 2010–2012 роках порівняно з лише 21 подією на рік у середньому в 1967–2000 роках³⁹.

Видалення гірської породи з шахт знижує утримувальне навантаження на сусідні розломи та наближає їх до руйнування. Одночасне відкачування води під час видобутку знижує поровий тиск, збільшуючи міцність розломів і нейтралізує ефект виносу породи. Ці процеси приблизно врівноважуються, поки шахту не покинуть і не зупинять відкачування. Після цього природне поповнення підземних вод може сприяти сейсмічності.

Найбільший землетрус, який на сьогоднішній день був викликаний закачуванням рідини, це землетрус 2016 року з магнітудою 5,8 у Пауні, штат Оклахома⁴⁰.

Гідророзрив пласта

Газоносні сланцеві пласти піддаються гідророзриву («розриву») для підвищення проникності та вивільнення газу, що міститься. Зазвичай це робиться шляхом буріння неглибоких горизонтальних свердловин у цільовий пласт. Вводяться рідини, що містять хімічні

³⁸ Foulger G. R., Wilson M. P., Gluyas J. G., Julian B. R., Davies R. J. Global review of human-induced earthquakes. *Earth Sci. Rev.* 2018. Vol. 178. P. 438–514 [40].

³⁹ Ellsworth W. L. Injection-induced earthquakes. *Science*. 2013. Vol. 341. P. 142–149 [48].

⁴⁰ Foulger G. R., Wilson M. P., Gluyas J. G., Julian B. R., Davies R. J. Global review of human-induced earthquakes. *Earth Sci. Rev.* 2018. Vol. 178. P. 438–514 [40].

речовини та тверді речовини, призначені для поширення тріщин і сприяння їх розкриттю. Його широко застосовують у США, де він призвів до значного зниження вартості природного газу. Однак у регіонах з високою щільністю населення громадськість може бути стурбована потенційними наслідками для навколишнього середовища, включаючи забруднення ґрунтових вод, індустріалізацію та спричинені землетруси.

У США найбільшими землетрусами, пов'язаними з гідророзривом сланцевого газу, були зареєстровані чотири події $M > 3$ в Оклахомі та Огайо⁴¹.

Мілітарні впливи

Інцидент почався в 1961 році, коли Інженерний корпус армії пробурих свердловину глибиною 3,7 км у сильно тріщинуватому кристалічному докембрійському фундаменті в арсеналі Скелястих гор, на північний схід від Денвера, штат Колорадо⁴². Повідомляється, що свердловина призначена для утилізації забруднених стічних вод шляхом закачування у дно без облицювання 21 м. Захоронення почалося в березні 1962 року при тиску в діапазоні від атмосферного до $\sim 7,2$ МПа вище пластового тиску. За чотири роки до 1966 року було закачано 625 тис. м³ рідини.

Незначні землетруси почали відбуватися в районі Денвера незабаром після початку ін'єкції, і до 1967 року було зареєстровано понад 1500 землетрусів, деякі з яких були магнітудою 3–4. Кореляція між об'ємом закачки та частотою землетрусів, а також епіцентри, розташовані на відстані менше 8 км від свердловини⁴³.

Ядерні вибухи спричиняють землетруси, але доказів того, що це відбувається через хімічні вибухи, мало.

При дослідженнях ~ 30 % подій $M \sim 4$, ~ 60 % подій $M \sim 3$ і ~ 90 % подій $M \sim 2$, було визначено, що рівень напруги, вивільненої під час спровокованого землетрусу, не обов'язково збігається з доданим

⁴¹ Darold A., Holland A. A., Chen C., Youngblood A. Preliminary analysis of seismicity near Eagleton 1–29, Carter County, July 2014 Oklahoma Geological Survey Open-file Report OF2-2014. 2014. 17 p. [49]; Skoumal R. J., Brudzinski M. R., Currie B. S. Earthquakes induced by hydraulic fracturing in Poland township, Ohio Bull. *Seismol. Soc. Am.* 2015. Vol. 105. P. 189-197 [50].

⁴² Evans D. M. The Denver area earthquakes and the Rocky Mountain Arsenal disposal well. *Mt. Geol.* 1966. Vol. 3. P. 23-36 [51].

⁴³ Там само [51].

антропогенним навантаженням, оскільки також може вивільнятися вже існуюче тектонічне напруження. Таким чином можуть бути викликані непропорційно великі землетруси порівняно з пов'язаною з ними промисловою діяльністю. Знання величини найбільшого землетрусу, який може бути спричинений антропогенною діяльністю, є важливим для зменшення небезпеки. Спостережувані техногенні землетруси позитивно корелюють з масштабом відповідних промислових проектів, тиском і швидкістю закачування рідини, а також потужністю ядерних пристроїв.

Мінімальна кількість антропогенного стресу, необхідного для спровокування землетрусу, є нерозумною концепцією, оскільки землетруси відбуваються і за відсутності промислової діяльності. Розломи, близькі до руйнування, поширені в континентальній корі, тому індуковані землетруси можуть відбуватися практично будь-де. У регіонах між плитами ані інфраструктура, ані населення не можуть бути готові до землетрусів. Землетруси, спричинені антропогенною діяльністю, які спричиняють екологічну небезпеку, трапляються рідко, але в деяких випадках можуть бути серйозною проблемою, наприклад, у районах насичених екологічно небезпечними техногенними об'єктами. Зі збільшенням розміру проектів і щільності населення потенційна екологічна небезпека від спричинених землетрусів також зростає, і потрібні ефективні стратегії управління⁴⁴.

Природні процеси, які модулюють просторову та часову появу землетрусів, включають зміни тектонічної напруги, міграцію рідин у корі, земні припливи, поверхневий лід та снігове навантаження, сильні опади, зміни атмосферного тиску, розвантаження осадів та втрату ґрунтових вод. Такі процеси порушують напругу в розломах лише в невеликих кількостях, але, оскільки руйнування гірської породи під час землетрусів є критичним процесом, зародження кожної події в кінцевому підсумку викликається остаточною, поступовою зміною напруги. Тому не дивно, що антропогенна діяльність, яка збурює напругу в корі, навіть незначно, може модулювати сейсмічність. У більшості випадків такі ефекти, ймовірно, залишаються непоміченими,

⁴⁴ Foulger G. R., Wilson M. P., Gluyas J. G., Julian B. R., Davies R. J. Global review of human-induced earthquakes. *Earth Sci. Rev.* 2018. Vol. 178. P. 438–514 [40].

але в міру того, як промислові проекти поширюються та зростають у масштабі, кількість випадків, коли зв'язок очевидний, зростає⁴⁵.

Зростає ризик землетрусів на територіях, які раніше вважалися безпечними. Складні геологічні умови міст та інших населених пунктів посилюють сейсмічну небезпеку. Розвиток міст і техногенний вплив на навколишнє середовище сприяють збільшенню водоспоживання, зростанню промислового та міського будівництва, зміні природних русел річок, створенню водосховищ, розвитку процесів підтоплення, що, у свою чергу, може спричинити виникнення та підвищення сейсмічної небезпеки техногенного походження для промислових і житлових будівель, для екологічно небезпечних техногенних об'єктів.

Встановлено, що при широкомасштабній розробці родовищ корисних копалин із застосуванням потужних вибухів у шахтах (на глибині 440 - 1300 м) не можна виключити виникнення землетрусів магнітудою понад 5,0 в районі с. Криворізької залізорудної структури. Висувається гіпотеза про їх природне та техногенне походження⁴⁶.

1.4. Аналіз підсилюючих факторів сейсмічної небезпеки

Природний і антропогенний гідрологічні режими могли мати значний вплив на час, місце, швидкість і магнітуду землетрусів⁴⁷.

Там, де водний шлях має неглибокий вріз, а рівень ґрунтових вод високий, існує ймовірність розрідження та пошкодження навколишнього ґрунту. Розрідження ґрунту відбувається, коли

⁴⁵ Там само [40].

⁴⁶ Kendzera O. V., Mykulyak S. V., Semenova Yu. V., Skurativska I. A., Skurativskyi S. I. Assessment of seismic response of a soil layer with the oscillating inclusions. *Geophysical journal*. 2020. Vol. 42 (4). P. 47–58 [3]; Kendzera O. V., Mykulyak S. V., Semenova Yu. V., Skurativska I. A., Skurativskyi S. I. Seismic response of a layered soil deposit with inclusions. *Geophysical journal*. 2021. Vol. 43 (2). P. 3–13 [4]; Pihulevskyi P. H., Kendzera O. V., Babiuk K. V., Anisimova L. B., Kyryliuk O. S. Connection of Kryvbas tectonics with natural and technogenic seismicity. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. Vol. (2), P. 5–10 [13].

⁴⁷ Quigley M., Duffy B. Effects of Earthquakes on Flood Hazards: A Case Study From Christchurch, New Zealand. *Geosciences*. 2020. Vol. 10. 114 p. URL: <https://doi.org/10.3390/geosciences10030114> [52].

незчеплений насичений або частково насичений ґрунт втрачає значну міцність і жорсткість у відповідь на прикладену напругу, таку як струшування під час землетрусу або інші раптові зміни умов напруги, в яких матеріал, який зазвичай є твердою речовиною, поводить як рідина.

Поштовхи ґрунту під час землетрусу в Дарфілді 4 вересня 2010 року (магнітуда 7,1) досягли максимального значення прискорення ґрунту в 1,25 g, спричинивши значні пошкодження ґрунту через розрідження. Зрідження може відбуватися в насичених, погано консолидованих родовищах. Під час землетрусу частинки ґрунту перегруповуються та намагаються ущільнитися. Вода витісняється з порового простору, і зерна більше не можуть витримувати вагу розкривного шару. Якщо вода під тиском може витікати на поверхню землі, наприклад крізь тріщини він може переносити з собою мул і пісок, утворюючи піщані кипіння та викликаючи поверхневе затоплення. Скидання води та мулу призводить до зменшення об'єму, що призводить до осідання поверхні. Також може відбуватися латеральне розповсюдження, особливо поблизу водних шляхів, де рівень ґрунтових вод зазвичай високий і вільна земля може переміщатися вбік над розрідженим ґрунтом на глибині. Це проявляється у вигляді розтріскування і різного осідання ураженої землі. Фізичні характеристики ґрунтів, окрім надання інформації про відносний вік поверхні ґрунту, також виділяють параметри, пов'язані зі схильністю до розрідження. Вік ґрунту є важливим фактором, оскільки старі ґрунти, як правило, щільніші та більш консолидовані, а зв'язування частинок, яке, як правило, супроводжує старіння, означає, що старі ґрунти, швидше за все, будуть більш стійкими до землетрусів. Структура ґрунту (гранулометричний склад) відображає пористість і щільність (порожній простір) і, отже, потенційну водонасиченість, тоді як дренаж ґрунту відображає частоту насичення, зазвичай вказуючи на наявність або відсутність високого рівня ґрунтових вод⁴⁸.

⁴⁸ Brackley H. L. Review of Liquefaction Hazard Information in Eastern Canterbury, Including Christchurch City and Parts of Selwyn, Waimakariri and Hurunui Districts; GNS Science Consultancy Report 2012/218; Canterbury Regional Council: Canterbury, New Zealand. 2012. 99 p. [53]; Degtyariev K., Gnitko V., Kononenko Y., Kriutchenko D., Sierikova O., Strelnikova E. Fuzzy Methods for

Quigley M. та Cavalieri F. досліджували як землетруси можуть впливати на небезпеку повеней, змінюючи потік, об'єми та розподіл поверхневих та підземних вод і спричиняючи фізичні зміни природного та штучного середовища (наприклад, висоти, топографічного рельєфу, водопроникності), які впливають на поверхневий і підповерхневий гідрологічні режими⁴⁹.

Шторм «Алекс» на півдні Франції 2 жовтня 2020 року спричинив місцеві опади понад 600 мм менш ніж за 24 години. 114 локальних землетрусів з магнітудою $ML = 0,5$ та $ML = 2,5$ були викликані гідрологічним навантаженням та/або результуючим збільшенням підземного порового тиску. Це дослідження показує вплив шторму «Алекс» на поверхню Землі та процеси в глибинних шарах і прокладає шлях для майбутніх робіт, які зможуть розкрити додаткові подробиці цих процесів⁵⁰ автори доводять, що необхідно враховувати вплив розмиву повеней на сейсмічні властивості конструкцій.

Відповідно до ДБН В.1.1-12:2014⁵¹ дані представлені в Таблиці 1.1.

Modelling Earthquake Induced Sloshing in Rigid Reservoirs. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2022. P. 297-302. URL: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916466> [54]; Sierikova O., Strelnikova E., Degtyarev K. Seismic Loads Influence Treatment on the Liquid Hydrocarbon Storage Tanks Made of Nanocomposite Materials. *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*. 2022. Vol. 17. P. 62-70. URL: <https://doi.org/10.37394/232011.2022.17.9> [55]; Cavalieri F., Franchin P., Giovinazzi S. Multi-hazard assessment of increased flooding hazard due to earthquake-induced damage to the natural drainage system. *Reliability Engineering & System Safety*. 2023. Vol. 237. 109348. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109348> [56].

⁴⁹ Quigley M., Duffy B. Effects of Earthquakes on Flood Hazards: A Case Study From Christchurch, New Zealand. *Geosciences*. 2020. Vol. 10. 114 p. URL: <https://doi.org/10.3390/geosciences10030114> [52].

⁵⁰ Chhmiel M., Godano M., Piantini M., Brigode P., Gimbert F., Bakker M., Courboux F., Ampuero J.-P., Rivet D., Sladen A., Ambrois D., Chapuis M. Brief communication: Seismological analysis of flood dynamics and hydrologically triggered earthquake swarms associated with Storm Alex. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2022. Vol. 22. is. 5. P. 1541–1558. URL: <https://doi.org/10.5194/nhess-22-1541-2022> [57].

⁵¹ ДБН В.1.1-12:2014 Будівництво у сейсмічних районах України. Київ : Мінеріонбуд України, 2014. 110 с. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-1083#load> [9].

Таблиця 1.1

Нормативна сейсмічність майданчика будівництва в залежності від категорії ґрунтів за сейсмічними властивостями

Категорія ґрунту за сейсмічними властивостями	Ґрунти	Нормативна сейсмічність майданчика будівництва за сейсмічності району, балів				Швидкості поширення сейсмічних хвиль в ґрунті, V_s , м/с
		6	7	8	9	
I	Скельні ґрунти усіх видів невивітрілі та слабо-вивітрілі; великоуламкові ґрунти щільні, мало- вологі з магматичних порід, які вміщують до 30 % піщано-глинистого заповнювача	5	6	7	8	$V_s > 800$
II	Скельні ґрунти вивітрілі і сильновивітрілі: великоуламкові ґрунти, за винятком віднесених до I категорії; піски гравіюваті, крупні та середньої крупності, щільні та середньої щільності, мало- вологі та вологі; піски дрібні і пилюваті, щільні і середньої щільності маловологі: пилювато-глинисті ґрунти із показником текучості $I_L \leq 0,5$ при коефіцієнті пористості $e < 0,9$ – для глин і суглинків, та $e < 0,7$ – для супісків	6	7	8	9	$500 < V_s < 800$

III	Піски пухкі незалежно від ступеня вологості та крупності; піски гравіюваті, крупні та середньої крупності, щільні та середньої щільності; піски дрібні та пилюваті, щільні та середньої щільності, вологі та водонасичені; пилювато-глинисті ґрунти із показником текучості $IL > 0,5$; пилювато-глинисті ґрунти із показником текучості $IL \leq 0,5$ при коефіцієнті пористості $e \geq 0,9$ – для глин і суглинків та $e \geq 0,7$ – для супісків	7	8	9	10	$200 < V_s < 500$
IV	Піски пухкі водонасичені, схильні до розрідження: насипні та гумусні ґрунти; пливуни, біогенні ґрунти та мули	За результатами спеціальних досліджень				$V_s < 200$

Примітка 1. У випадку неоднорідного складу ґрунти майданчика будівництва відносяться до найбільш несприятливої категорії ґрунту за сейсмічними властивостями, якщо у межах десятиметрового шару ґрунту, починаючи відлік від планувальної відмітки у випадку виймання і чорної відмітки у випадку насипання, сумарна потужність шарів, що відносяться до цієї категорії, перевищує 5 м.

Примітка 2. У разі прогнозування підйому рівня ґрунтових вод та (або) обводнення ґрунтів у процесі експлуатації будівлі, категорії ґрунту слід визначати в залежності від властивостей ґрунту (ступеня вологості, показника текучості) у замоченому стані (за винятком локального аварійного замочування, вплив якого при уточненні сейсмічності майданчика не враховується).

Примітка 3. Пилювато-глинисті ґрунти (зокрема просідаючі твердої консистенції або в твердому стані) при коефіцієнті пористості поблизу значень $e = 0,9$ – для глин і суглинків та $e = 0,7$ – для супісків можуть бути віднесені до II категорії за сейсмічними властивостями, якщо нормативне

значення їх модуля деформації $E \geq 15$ МПа, а при експлуатації споруд будуть забезпечені умови непідтоплення ґрунтів основи. За відсутності даних щодо консистенції або вологості глинисті та пісчані ґрунти при положенні рівня ґрунтових вод вище 5 м відносяться до III категорії.

Примітка 4. Переважаючий період власних коливань ґрунтової товщі визначається за результатом мікро- сейсморайонування. У разі відсутності даних сейсмічного мікрорайонування допускається визначати період власних коливань ґрунтової товщі за додатком В.

Примітка 5. Сейсмічність майданчика визначається в цілих балах. Для ґрунтових умов, за яких можливе визначення категорії ґрунту за сейсмічними властивостями як проміжне, визначення бальності за інтерполяцією не допускається, а остаточне рішення приймається вишукувальною організацією за результатами додаткових досліджень і/або комплексним аналізом.

Примітка 6. Насипні ущільнені ґрунти при їх відсипанні і масиви укріплених ґрунтів залежно від їх зернового складу, показників e , IL , S і величини модуля деформації можуть бути віднесені вишукувальною організацією до II або III категорії за відповідними вимогами, які сформовані в описовій частині таблиці.

Відповідно до ДБН В.1.1-12:2014⁵² розрахункова сейсмічність залежить від типу ґрунту та його водонасиченості. Розрахункова сейсмічність підвищується на 1 бал порівняно з нормативною при глибині залягання рівня ґрунтових вод менше 4 м від поверхні, в ґрунтах 3-ї категорії.

Тому, важливим супутнім завданням у вивченні сейсмічної небезпеки є вивчення підвищеного рівня ґрунтових вод і проблеми підтоплення.

1.5. Аналіз проблеми розвитку підтоплення на території розміщення резервуарів

На сучасному етапі розвитку та прояву екологічних факторів підтоплення можна визначити як складний, здебільшого техногенний, процес неухильного підвищення рівня ґрунтових вод і вологості порід у

⁵² Там само [9].

зоні аерації, що ускладнює або зумовлює унеможлиблюють нормальну роботу господарських об'єктів, а також погіршують екологічні умови життя⁵³.

Відповідно до Державних санітарних правил планування і забудови населених пунктів до підтоплених територій міст відносяться території, де рівень ґрунтових вод знаходиться ближче 2,5 м від поверхні землі⁵⁴. Нормативне значення (2–2,5 м) забезпечує глибину залягання ґрунтових вод нижче підлоги підвальних приміщень житлових будинків другої половини минулого століття. У більшості сучасних будівель підземна частина знаходиться набагато глибше, тому проблема затоплення та екологічної небезпеки особливо актуальна в сучасних міських умовах.

З кожним роком площа підтоплених міських територій

⁵³ ДБН В.1.2-14-2009 Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. Київ : Мінрегіонбуд України, 2017. 29 с. [58]; ДБН В.2.1-10-2009 Основи та фундаменти будинків і споруд. Основні положення проектування (зі змінами №1 і №2). Київ : Мінрегіонбуд України, 2017. 82 с. [59]; ДСТУ Б В.2.6-183:2011.Резервуари вертикальні циліндричні сталеві для нафти та нафтопродуктів. Загальні технічні умови. Київ : Укрндіпроектстальконструкція, 2012. 82 с. [60]; Dong Z. Q., Li G., Song B., Lu G. H., Li H. N. Failure risk assessment method of masonry structures under earthquakes and flood scouring. *Mech. Adv. Mater. Struct.* 2022. Vol. 29. P. 3055–3066 [61]; Sierikova O., Koloskov V., Strelnikova E. The groundwater level changing processes modeling in 2d and 3d formulation. *Acta Periodica Technologica.* 2022. Vol. 53. P. 36-47. URL: <https://doi.org/10.2298/APT2253036S> [62]; Серікова О. М., Стрельнікова О. О., Колосков В. Ю. Підвищення рівня екологічної безпеки забудованих територій України, схильних до підтоплення : монографія. Харків : НУЦЗ України, 2020. 142 с. [63]/

⁵⁴ Serikova E. N., Yakovlev V. V. Additional infiltration to underground waters of big cities territory (on example Kharkiv region). In: Babaev V. N. (Ed.): *Proc.: Municipal Economy of Cities.* № 97, Kharkiv, KNAME. 2011. P. 344-348 [64]; Sierikova E., Strelnikova E. Environmental safety of building development on the Kharkiv city flooding areas example. *Noble International Journal of Scientific Research.* 2019. Vol. 3(8). P. 72-78 [65]; Serikova E., Strelnikova E., Yakovlev V. The Programme of Measures to Prevent Flooding on the Built-up Areas on Example of Kharkiv City. *International Journal of Development Research.* 2015. Vol. 5(12). P. 6236–6240 [66]; Serikova E., Strelnikova E., Yakovlev V. Mathematical model of dangerous changing the groundwater level in Ukrainian industrial cities. *Journal of Environment Protection and Sustainable Development.* 2015. Vol. 1. № 2. P. 86-90 [67].

збільшується. Повінь охопила багато міст світу. Причини підтоплення різні. Затоплені міста України, європейської частини Росії, Уралу, Сибіру, Казахстану, Середньої Азії. Не оминув цей несприятливий процес і міста Великої Британії, країни Західної, Центральної та Східної Європи, США, Бразилію, Індію, Китай, Саудівську Аравію.

Відомо, що процес підтоплення викликає та активізує низку небезпечних геологічних процесів, тому посилення підтоплення, яке відбувається в окремих регіонах України протягом останніх років, є реальною загрозою безпеці населення та функціонування численних господарських об'єктів. У зв'язку з цим питання вивчення умов розвитку та поширення підтоплених територій по всій території держави, а також організації моніторингу за ними набуває ряду пріоритетних та актуальних. В умовах посилення впливу техногенних факторів спостерігається тенденція до розширення зон затоплення та негативного впливу на довкілля⁵⁵.

Порушення режиму підземних вод, освоєння і розширення підтоплених територій є наслідком втрат води гідротехнічними спорудами, безгосподарного використання територій, що освоюються, недотримання вимог законодавства при проектуванні та будівництві нових об'єктів, недотримання вимог законодавства. -виконання державних планів і програм через недостатнє фінансування, своєчасне проведення пошуків, ретроспективних аналізів інженерно-геологічного стану територій забудови, відсутність якісних довгострокових прогнозів.

В Україні за період з 1984 по 2000 рік кількість міст і селищ із постійними проявами підтоплення зросла з 265 до 541 (удвічі), а загальна площа підтоплених територій у цих містах і селищах зросла з 88667 до 196205 га. У 2004 році повені, як природні, так і техногенні, охопили в цілому близько 70 тис. км² (7 млн га), або 12 відсотків території держави. У 2011–2014 рр. підтоплена територія території України вже становила 79,44 тис. км² (7,9 млн га), а кількість підтоплених населених пунктів зросла до 4702⁵⁶. На 2021 рік підтоплена територія України становить майже 89 тис. км².

Залежно від основного джерела підтоплення та комплексу факторів впливу підтоплені території поділяються на три види:

⁵⁵ Серікова О. М., Стрельнікова О. О., Колосков В. Ю. Підвищення рівня екологічної безпеки забудованих територій України, схильних до підтоплення : монографія. Харків : НУЦЗ України, 2020. 142 с. [63].

⁵⁶ Там само [63].

- затоплення в природних умовах, джерелами затоплення є природні атмосферні опади (талі, паводкові та дощові води), баланс підземних вод не порушується. До цього типу належать Полісся (Волинська, Житомирська, Рівненська області та північна частина Київської областей);

- природне і техногенне підтоплення, де баланс підземних вод порушується незначно або порушується внаслідок збільшення їх живлення, що пов'язано зі зниженням природного дренажу території. Поширений у центральних і південних областях України – Дніпропетровській, Запорізькій, Харківській, Луганській, Донецькій та на півночі Одеської, Миколаївської та Херсонської областей;

- техногенне підтоплення, у порушених умовах з порушенням балансу підземних вод під впливом господарської діяльності переважають техногенні джерела підтоплення - зрошувальні системи, канали, водосховища, ставки, в населених пунктах - мережі водопостачання та водовідведення. По всій території України спостерігаються зони техногенного підтоплення. Херсонська, Одеська, Миколаївська, Дніпропетровська, Запорізька, Донецька та південно-східні частини Полтавської та Харківської областей належать до найбільш техногенно завантажених регіонів.

Підтоплення є одним із найпоширеніших сучасних екзогенних геологічних процесів, що розвивається як у природних умовах, так і під впливом техногенних факторів. Часто вирішальними є техногенні фактори. Суть цього процесу полягає в підвищенні рівня ґрунтових вод внаслідок порушення водного балансу території, який досягає критичних значень і потребує застосування захисних заходів. Цей процес відносять до найнебезпечніших для життя людини⁵⁷.

⁵⁷ Serikova E. N., Yakovlev V. V. Additional infiltration to underground waters of big cities territory (on example Kharkiv region). In: Babaev V. N. (Ed.): *Proc.: Municipal Economy of Cities*. № 97, Kharkiv, KNAME. 2011. P. 344-348 [64]; Sierikova E., Strelnikova E. Environmental safety of building development on the Kharkiv city flooding areas example. *Noble International Journal of Scientific Research*. 2019. Vol. 3(8). P. 72-78 [65]; Serikova E., Strelnikova E., Yakovlev V. The Programme of Measures to Prevent Flooding on the Built-up Areas on Example of Kharkiv City. *International Journal of Development Research*. 2015. Vol. 5(12). P. 6236–6240 [66]; Serikova E., Strelnikova E., Yakovlev V. Mathematical model of dangerous changing the groundwater level in Ukrainian industrial cities. *Journal of Environment Protection and Sustainable Development*. 2015. Vol. 1. № 2. P. 86-90 [67].

Відомо, що процес підтоплення викликає і активізує ряд небезпечних геологічних процесів. Тому активізація паводків, що відбуваються в окремих регіонах України в останні роки, є реальною загрозою безпеці населення та функціонуванню численних об'єктів господарювання. У зв'язку з цим першочерговим та актуальним стає питання вивчення умов розвитку та поширення підтоплених територій по всій території держави, а також організації моніторингу за ними. В умовах посилення впливу техногенних факторів спостерігається тенденція до розширення площ підтоплення та негативного впливу на довкілля⁵⁸.

Порушення режиму підземних вод, забудова і розширення підтоплених територій є результатом втрат води з водопровідних комунікацій, безгосподарного ставлення до територій, що забудовуються, недотримання вимог законодавства при проектуванні та будівництві нових об'єктів, невиконання державних планів і програм через недостатнє фінансування, своєчасні дослідження, відсутність ретроспективного аналізу інженерно-геологічного стану територій забудови, відсутність якісних довгострокових прогнозів⁵⁹.

Необхідно врахувати техногенні чинники, що впливають на розвиток паводків міської території, вдосконалити прогноз зміни рівня ґрунтових вод, комплексне управління підземними водами міст.

У багатьох роботах запропоновано систему управління підтопленням урбанізованих територій, яка включає управлінські та інженерні заходи щодо запобігання та ліквідації наслідків підтоплення,

⁵⁸ Серікова О. М., Стрельникова О. О., Колосков В. Ю. Підвищення рівня екологічної безпеки забудованих територій України, схильних до підтоплення : монографія. Харків : НУЦЗ України, 2020. 142 с. [63]; Serikova E. N., Yakovlev V. V. Additional infiltration to underground waters of big cities territory (on example Kharkiv region). In: Babaev V. N. (Ed.): *Proc.: Municipal Economy of Cities*. № 97, Kharkiv, KNAME. 2011. P. 344-348 [64]; Sierikova E., Strelnikova E. Environmental safety of building development on the Kharkiv city flooding areas example. *Noble International Journal of Scientific Research*. 2019. Vol. 3(8). P. 72-78 [65]; Serikova E., Strelnikova E., Yakovlev V. The Programme of Measures to Prevent Flooding on the Built-up Areas on Example of Kharkiv City. *International Journal of Development Research*. 2015. Vol. 5(12). P. 6236–6240 [66]; Serikova E., Strelnikova E., Yakovlev V. Mathematical model of dangerous changing the groundwater level in Ukrainian industrial cities. *Journal of Environment Protection and Sustainable Development*. 2015. Vol. 1. № 2. P. 86-90 [67].

⁵⁹ Там само [63]; [64]; [65]; [66]; [67].

а також алгоритм дій під час моніторингу рівня ґрунтових вод на затоплених та потенційно затоплених територій⁶⁰.

⁶⁰ Серікова О. М., Стрельнікова О. О., Колосков В. Ю. Підвищення рівня екологічної безпеки забудованих територій України, схильних до підтоплення : монографія. Харків : НУЦЗ України, 2020. 142 с. [63]; Sierikova E. N., Strelnikova E. A. Mathematical Modeling of Groundwater Level Changing with Considering Evapotranspiration Factor. *International Journal of Modern Studies in Mechanical Engineering (IJMSME)*. Volume 6, Issue 1, ARC Publications, LLC, USA. 2020. P. 19–25. <http://dx.doi.org/10.20431/2454-9711.061003> [67]; Verma P. The laplace transform solution of a one dimensional groundwater recharge by spreading. *Annals of Geophysics*. 1969. 22(1). P. 25-31 [70]; Ковальчук В. Особливості методології системного управління водним режимом територій для захисту від підтоплення. *Індуктивне моделювання складних систем*. 2014. Вип. 6. С. 97–106 [71]; Ромащенко М. І. Савчук Д. П. Шляхи модернізації систем захисту територій від підтоплення в умовах зрошення. *Вісн. аграр. науки*. 2000. № 4. С. 59–64 [72]; Ромащенко М. І., Савчук Д. П. Підтоплення земель в Україні. *Вісн. аграр. науки*. 2001. № 8. С. 54–59 [73]; Гранько О. В. Напружено-деформований стан тривало навантажених лесових основ за умови їх підтоплення : автореф. дис. канд. техн. наук. Полтав. нац. техн. ун-т ім. Ю.Кондратюка. Полтава, 2008. 20 с. [74]; Бабіченко В. Я. Нагальні проблеми ліквідації підтоплення ґрунтовими водами територій міст і селищ міського типу України. Матеріали доп. і повідомл. міжнар. конф. (14-16 жовт. 1998 р., м. Харків. 1998). Харків. 1998. Ч. 1. С. 106 [75]; Биченок М. М., Іванюта С. П., Яковлев Є. О. Про вплив екзогенних геологічних процесів на рівень техногенних ризиків життєдіяльності. Збірник наукових праць Українського державного геологорозвідувального інституту. 2006. №1. С. 85– 91 [76]; Волошкіна О. С., Березницька Ю. О., Яковлев Є. О. Дослідження рівнів впливу регіонального підтоплення на якість поверхневих водних ресурсів. *Екологічна безпека та природокористування*. 2008. № 1. С. 61–70 [77]; Вижва С., Цюпа І. Динаміка процесів підтоплення центральної частини національного комплексу «Експоцентр України» за даними геофізичних досліджень. *Вісник Київського національного університету ім. Т. Г. Шевченка*. 2010. № 49. С. 32–35 [78]; Кошляков О. Є., Диняк О. В. Досвід застосування геоінформаційних технологій для вивчення процесу підтоплення територій долин малих річок м. Києва. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльн.* 2007. № 1. С. 25–29 [79]; Сай В. М. Дослідження процесу підтоплення земель з врахуванням соціально-економічних збитків. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2011. № 75. С. 127–132 [80]; Меньлюк А. І., Петровський А. Ф., Борисов О. О., Кирилюк С. В. Влаштування протифільтраційного екрана для захисту підземного простору від підтоплення. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. 2018. Т.29 (68) Ч. 3. № 1. С. 176–180 [81]; Кремез В. С., Буц Ю. В., Цимбал В. А. Моделювання процесу підтоплення територій в зоні впливу водосховищ. *Людина та довкілля*.

Питання потоку підземних вод обговорювалося багатьма вченими з різних точок зору, наприклад, Клуते⁶¹ звів рівняння дифузії до звичайного диференціального рівняння та застосував метод прямого інтегрування та ітерації отриманого рівняння, Верма⁶² отримав розв'язок рівняння, що описує одновимірну подачу підземних вод для постійної дифузії та лінійної провідності за допомогою перетворення Лапласа. Прасад та ін.⁶³ створив чисельну модель для моделювання потоку вологи через ненасичені зони методом скінченних елементів. Desai⁶⁴ отримав композиційне рішення для розширення ґрунтових вод

Проблеми неоекології. 2012. № 1–2. С. 128–130 [82]; Лущик А. В., Швирло М. І., Лущик А. А., Парак Т. Ю. Основні положення щодо удосконалення системи моніторингу при підтопленні територій. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2003. № 6. С. 33–37 [83]; Лущик А. В., Швирло М. І., Яковлев Є. О. Основні зміни інженерно-геологічних умов у межах підтоплених територій та напрями їх довивчення. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2003. № 6. С. 28–32 [84]; Разметаєв С. В., Чебанов О. Ю. Про стратегію та головні завдання вирішення проблеми підтоплення населених територій в Україні. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2003. № 6. С. 5–11 [85]; Голуб В. П. Умови та фактори техногенного підтоплення. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2005. № 1. С. 29–32 [86]; Барщевський М. Є., Гриневецький В. Т., Сорокіна Л. Ю. Підтоплення земель в Україні: проблема та шляхи її подолання. *Укр. геогр. журн.* 2003. № 2. С. 3–8 [87]; Абрамов І. Б. Формування підземних вод промислово-міських агломерацій (науково-методичні аспекти екологічної безпеки): Автореф. дис. д-ра техн. наук. Нац. акад. природоохорон. та курорт. буд-ва. Сімферополь, 2007. 36 с. [88]; Телима С. В. Дослідження розвитку процесів підтоплення в період 1980–2004 років. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідраліки*. 2006. Вип. 7. С. 127–140 [89]; Серікова О. М. Прогнозування і управління рівнем ґрунтових вод для підвищення екологічної безпеки забудованих територій України : дис. ... канд. техн. наук: 21.06.01. Харків : Харківський нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, 2019. 166 с. [90].

⁶¹ Klute A. A numerical method for solving the flow equation for water in unsaturated materials. *Soil Science*. 1952. 73(2). P. 105-116 [69].

⁶² Verma P. The laplace transform solution of a one dimensional groundwater recharge by spreading. *Annals of Geophysics*. 1969. 22(1). P. 25-31 [70].

⁶³ Prasad K. H. Sensitivity to unsaturated soil properties. *Sadhana, Indian Academy of Sciences*. 2019. Vol. 26(6). P. 517-528 [91].

⁶⁴ Desai N. B. The study of problems arises in single phase and multiphase flow through porous media. Ph.D. Thesis, South Gujarat University, Surat, India. 2002 [92]; Joshi M. S., Desai N. B., Mehta M. N. One dimensional and unsaturated fluid flow

у вертикальному напрямку. Шах К. і Кунджан Т.⁶⁵ отримали розв'язок рівняння Бюргера для опису одновимірного запасу підземних вод шляхом дифузії в пористому середовищі. Джоші та інші⁶⁶ отримали рішення рівняння для одновимірного вертикального поповнення підземних вод, використовуючи груповий теоретичний підхід. Нассері та ін.⁶⁷ дослідили розв'язок рівняння адвекції-дифузії на основі спрощеної моделі Брукса-Корі для провідності та дифузії ґрунту.

Koohestani N. розглядав лише природні фактори впливу на підземні води і на основі цих даних зробив прогноз змін у балансі підземних вод⁶⁸.

Таким чином, поширення територій з підвищеним рівнем ґрунтових вод призведе до поширення проявів сейсмічних небезпек на територіях, що раніше вважалися сейсмічно безпечними. Обводнені ґрунти сприятимуть підвищенню сейсмічної небезпеки.

1.6. Аналіз стану забезпечення екологічної безпеки резервуарів зберігання рідких вуглеводнів в умовах сейсмічних навантажень

Сьогодні ще недостатньо накопичений досвід експлуатації РЗРВ в складних інженерно-геологічних умовах на штучних основах, особливо при дії таких небезпечних геологічних явищ як землетрус. Будівництво відповідальних споруд у складних інженерно-геологічних умовах із врахуванням сейсмічних впливів – одна з найскладніших

through porous media. *Int. J. Appl. Math. and Mech.* 2010. Vol. 6(18). P. 66–79 [93].

⁶⁵ Shah K., Kunjan T. Solution of Burger's Equation in a One-Dimensional Groundwater Recharge by Spreading Using q-Homotopy Analysis Method. *Eur. J. Pure Appl. Math.* 2016. Vol. 9, № 1. P. 114–124 [94].

⁶⁶ Joshi M. S., Desai N. B., Mehta M. N. One dimensional and unsaturated fluid flow through porous media. *Int. J. Appl. Math. and Mech.* 2010. Vol. 6(18). P. 66–79 [93].

⁶⁷ Nasser M., Daneshbod Y., Pirouz M. D., Rakhshandehroo G. R., Shirzad A. New analytical solution to water content simulation in porous media. *J. Irrig. Drain. Eng.* 2012. Vol. 138(4). P. 328–335 [95].

⁶⁸ Koohestani N., Halaghi M. M., Dehghani A. A. Numerical Simulation of Groundwater Level Using MODFLOW Software (A Case Study: Narmab Watershed, Golestan Province). *IJABIS.* 2013. Vol. 1(8). P. 858–873 [96].

задач геотехніки. При сейсмічних коливаннях виникають сейсмічні хвилі. Поздовжні хвилі призводять до стиснення-розтягування частинок ґрунту, поперечні – стають причиною перекосу або бічного зрушення. При бічному зсуві виникає небезпека порушення сил зчеплення між частинками ґрунту. Тому існує додаткова проблема – здатність ґрунтів змінювати свої механічні властивості при проходженні через них пружних хвиль. Суть ефекту полягає в тому, що ґрунти складаються з дрібних і найдрібніших часток, в проміжках (порах), між якими є вода й газ. Весь опір такого ґрунту зовнішньому навантаженню здійснюється за рахунок величезного числа контактів між цими частками, багато з яких дуже слабкі. При проходженні пружної хвилі збуджуються коливання частинок ґрунту з різними швидкостями і частина контактів (тим більша, чим вище енергія хвилі) розривається. Крім того при переході хвилі від більш щільного до пухкого шару ґрунту та суттєвому (у два рази і більше) збільшенню амплітуди коливання, порушення зчеплення стає реальним. В результаті міцність ґрунту помітно (іноді в кілька разів) знижується. При цьому ґрунт стає «текучим», це явище називають «розрідженням» ґрунту (він опиняється у зваженому водою стані). Вода при цьому прагне віджатися, але процес цей вимагає деякого часу, оскільки обмежується водопроникністю ґрунту.

Особливістю РЗРВ є той факт, що вони навіть в штатному режимі експлуатації знаходяться у складному напружено-деформованому стані (НДС). НДС елементів РЗРВ виникає вже на стадії виготовлення й виконання будівельномонтажних робіт. Подальше збільшення напружень в елементах конструкції резервуару є наслідком дії як експлуатаційних навантажень (гідростатичні навантаження, надмірний тиск, вакуум, снігові, вітрові та температурні навантаження), так і результатом нерівномірного осідання основи його фундаментів як по площі, так і по периметру. Тому для забезпечення технологічних експлуатаційних вимог при зведенні РВС на слабких і просадочних ґрунтах доводиться прорізати ці ґрунти пальовими фундаментами чи використовувати різні види штучних основ⁶⁹.

⁶⁹ Зоценко М. Л., Винников Ю. Л., Харченко М. О., Ларцева І. І. Забезпечення надійної експлуатації нафтових резервуарів у складних геотехнічних умовах при сейсмічних впливах. *Проблеми та перспективи нафтогазової промисловості*. 2018. Вип. 2. С. 65-90. URL: <https://doi.org/10.32822/naftogazscience.2018.02.065> [20].

Часто резервуари зводять на територіях зі складними геотехнічними умовами (ДБН В.1.1-45:2017, 2017): 1) ґрунти з особливими властивостями (просадочні та заторфовані, мули, насипні й намівні масиви, ґрунти, які за певних умов збільшують свій об'єм тощо); 2) можливість розвитку небезпечних геологічних (гравітаційних) процесів (карсти, зсуви, ерозійні, суфозійні, абразивні процеси і т. ін.), а також прояви нерівномірних деформацій ґрунтових основ при замоканні, проведенні гірничих робіт й ін.⁷⁰.

II група захисту «Недопущення додаткового зволоження ґрунтової основи» з урахуванням вимог ДБН В.1.1-24, ДБН В.1.1-25, ДБН В.1.1-46, ДБН В.1.2-14, ДБН В.2.1-10, ДБН В.2.2-15, ДСТУ-Н Б В.2.1-29 включає⁷¹:

- використання захисних гідроізоляційних екранів під будівлями і спорудами з використанням гідроізоляційних мембран;
- будівництво вертикальних протифільтраційних завіс зі шпунту, паль, що перетинаються, джет-елементів, гідроізоляційних завіс ін'єкційного типу на основі перетвореного шару ґрунту з ін'єктованими розчинами мінеральних, полімінеральних чи полімерних складів, а також "стін у ґрунті", які не дозволяється застосовувати в великоуламкових ґрунтах, пливунах, і артезіанських водоносних шарах ґрунтів з надлишковим напором, який перевищує тиск глинистої суспензії на стінки траншей⁷².

Aftab Alam Khan доводить у своїх дослідженнях, що зміна парадигми культури від надання допомоги після катастрофи та реабілітації до підготовки та практики до катастрофи зменшить рівень руйнувань від майбутнього землетрусу. Необхідне фізичне планування перед стихійним лихом і відповідні будівельні заходи, а також управління ризиками до та

⁷⁰ ДБН В.1.1-45:2017 Будівлі і споруди в складних інженерно-геологічних умовах. Загальні положення. Київ : Мінрегіонбуд України, 2017. 39 с. [97].

⁷¹ Chhmiel M., Godano M., Piantini M., Brigode P., Gimbert F., Bakker M., Courboux F., Ampuero J.-P., Rivet D., Sladen A., Ambrois D., Chapuis M. Brief communication: Seismological analysis of flood dynamics and hydrologically triggered earthquake swarms associated with Storm Alex. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2022. Vol. 22. is. 5. P. 1541–1558 [57]. URL: <https://doi.org/10.5194/nhess-22-1541-2022>; ДБН В.1.2-14-2009 Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. Київ : Мінрегіонбуд України, 2017. 29 с. [58].

⁷² ДБН В.1.1-45:2017 Будівлі і споруди в складних інженерно-геологічних умовах. Загальні положення. Київ : Мінрегіонбуд України, 2017. 39 с. [97].

після стихійного лиха повинні приділяти особливу увагу програмам інформування громадськості щодо зменшення збитків⁷³.

1.7. Аналіз сейсмічних впливів на резервуари зберігання рідких вуглеводнів

Щорічно Україна споживає більше ніж 20 млн тонн нафти, що передбачає експлуатацію досить великого резервуарного парку країни. Встановлено, що на 1 тону видобутої або переробленої нафти необхідний для зберігання обсяг повинен становити 0,4–0,5 м³. Дослідження та аналіз джерел екологічного впливу під час експлуатації резервуарів засвідчують, що резервуари зберігання рідких вуглеводнів, навіть за штатної експлуатації відносяться до екологічно небезпечних об'єктів⁷⁴.

Обсяг втрат нафтопродуктів при зберіганні в результаті малих і великих дихань залежить від умов роботи резервуарних парків. Так, структура втрат від випару в резервуарних парках нафтопереробних підприємств наступна: втрати від вентиляції газового простору 60–65 %, від великих дихань і зворотного видиху - 32–34 %, малих дихань - 3–6 %. Високий відсоток втрат при вентиляції газового простору пояснюється порушенням вимог герметизації резервуарів (особливо даху), втрати від великих дихань обумовлені високою оборотністю резервуарів. В умовах тривалого зберігання нафтопродуктів втрати відбуваються в основному від малих дихань⁷⁵.

⁷³ Khan A. A. The geo-genetic status of earthquake-related hazards and the role of human and policy dimensions in impact mitigation. *Environmental Hazards*. 2018. Vol. 17(4). P. 276–291. URL: <https://doi.org/10.1080/17477891.2018.1498763> [98].

⁷⁴ Khalmuradov B. D., Harbuz S. V., Ablicieva I. Y. Analysis of the technogenic load on the environment during forced ventilation of tanks. *Technology audit and production reserves*. 2018. № 1/3 (39). P. 45–52 [99]; Гарбуз С. В. Системний підхід до зниження екологічної небезпеки вентиляції резервуарів з нафтопродуктами. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Сер.: Механіко-технологічні системи та комплекси*. Харків: НТУ «ХПІ», 2016. № 7 (1179). С. 106–118 [100]; Khalmuradov B., Harbuz S., Ablicieva I. Analysis of the technogenic load on the environment during Forced ventilation of tanks. *Technology audit and production reserves*. 2018. Vol. 1/3 (39). P. 45–52. URL: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.124341> [101].

⁷⁵ Олійник В. В., Гончаренко Я. О. Втрати нафтопродуктів при випарі їх в

Дослідженням найбільш екологічно небезпечних джерел техногенного навантаження на довкілля, а саме резервуарів зберігання нафтопродуктів як об'єктів неконтрольованих викидів пароповітряних сумішей чи парогазоповітряних сумішей та проливів нафтопродуктів із подальшим виникненням пожеж і вибухів займався Гарбуз С. В.⁷⁶.

Вплив сейсмічних навантажень на резервуари для зберігання рідких вуглеводнів призводить до порушення стійкості резервуарів, їх герметичності, що в свою чергу веде до забруднення атмосферного повітря, підземних і поверхневих вод та ґрунтів внаслідок аварійних виливів та пожеж на резервуарах для зберігання екологічно небезпечних речовин. Надзвичайні ситуації, що супроводжуються розливами рідких вуглеводнів, призводять до деградації екосистем, а отже є фактором екологічного ризику.

Ємності та резервуари для зберігання нафтопродуктів, токсичних і легкозаймистих рідин широко використовуються в різних галузях інженерної практики, таких як авіабудування, хімічна, нафтогазова промисловість, енергетика і транспорт. Ці резервуари працюють в умовах високих технологічних навантажень і заповнені маслом, легкозаймистими або токсичними речовинами. В результаті раптової дії сейсмічних навантажень рідина, що зберігається в резервуарах, починає відчувати інтенсивне плескання.

Плескання - це явище, яке спостерігається в ряді промислових об'єктів: в ємностях для зберігання зрідженого газу, нафти, паливних баках, в баках вантажних танків. Відомо, що частково заповнені резервуари піддаються особливо інтенсивним бризкам. Це може призвести до високого тиску на стінки резервуару, руйнування конструкції або втрати стійкості та може спричинити витік небезпечного

навколишнє середовище з резервуарів зі стаціонарною покрівлею. Матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. Черкаси : ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. (Черкаси, 20–21 жовтня 2017 р.). 2017. С. 169–171 [102].

⁷⁶ Адаменко М. І., Гарбуз С. В. Інформаційна модель розповсюдження забруднення атмосфери викидами із резервуарів з залишками нафтопродуктів під час їх провітрювання. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Сер.: Механіко-технологічні системи та комплекси*. Харків: НТУ «ХПІ». 2016. № 17 (1189). С. 115–121 [103].

вмісту, що, у свою чергу, може призвести до серйозних екологічних наслідків⁷⁷.

У частково заповнених резервуарах під час землетрусів виникає сильне плескання, яке може спричинити динамічні навантаження на конструкцію резервуара. Щоб запобігти структурним пошкодженням, правильне прогнозування сил, спричинених плесканням, має вирішальне значення.

На плескання, як правило, впливає геометрія резервуара, частота й амплітуда руху, кількість рідини в резервуарі та властивості рідини. Експериментальні та чисельні дослідження були проведені, щоб дослідити вплив розмірів і пружності основи резервуару та частоти системи рідин-бак на плескання при гармонічних збудженнях⁷⁸.

Дослідники експериментально та чисельно досліджували плескання внаслідок збудження землетрусу⁷⁹. Існують більш пізні дослідження, що досліджують плескання через сейсмічні збудження,

⁷⁷ Sierikova O., Strelnikova E., Kriutchenko D. Membrane installation in storage tanks for seismic loads impact protection. *Acta Periodica Technologica*. 2023. Vol. (54). P. 209–222. URL: <https://doi.org/10.2298/APT2354209S> [104].

⁷⁸ Stofan A.J.; Sumner I.E. *Technical Note*; Natl. Aeronaut. SP. Adm. Ohio, Louis Res. Center: Cleveland, OH, USA. 1963 [105]; Chiba M. Nonlinear hydroelastic vibration of a cylindrical tank with an elastic bottom, containing liquid. Part I: Experiment. *J. Fluids Struct.* 1992. Vol. 6. P. 181–206 [106]; Yalla S.K., Kareem A., Kantor J.C. Semi-active tuned liquid column dampers for vibration control of structures. *Eng. Struct.* 2001. Vol. 23. P. 1469–1479 [107]; Bredmose H., Brocchini M., Peregrine, D.H., Thais L. Experimental investigation and numerical modelling of steep forced water waves. *J. Fluid Mech.* 2003. Vol. 490. P. 217–249 [108]; Akyildiz H., Ünal E. Experimental investigation of pressure distribution on a rectangular tank due to the liquid sloshing. *Ocean Eng.* 2005. Vol. 32. P. 1503–1516 [109]; Idelsohn S.R., Marti J., Souto-iglesias A., Oñate E. Interaction between an elastic structure and free-surface flows: Experimental versus numerical comparisons using the PFEM. *Comput. Mech.* 2008. Vol. 43. P. 125–132 [110].

⁷⁹ Pal P. Sloshing of Liquid in Partially Filled Container—An Experimental Study. *Int. J. Recent Trends Eng.* 2009. Vol. 1. P. 1–5 [111]; Michael Isaacson B., Ryu C.-S. Earthquake-Induced Sloshing in Vertical Container of Arbitrary Section. *J. Eng. Mech.* 1998. Vol. 124. P. 158–166 [112]; Hernández-Barrios H., Heredia-Zavoni E., Aldama-Rodríguez Á.A. Nonlinear sloshing response of cylindrical tanks subjected to earthquake ground motion. *Eng. Struct.* 2007. Vol. 29. P. 3364–3376 [113]; Panigrahy P. K., Saha U. K., Maity D. Experimental studies on sloshing behavior due to horizontal movement of liquids in baffled tanks. *Ocean Eng.* 2009. Vol. 36. P. 213–222 [114].

які розглядають ефект взаємодії між рідиною та структурою⁸⁰.

У статті⁸¹ було досліджено експериментально та чисельно поведінку розплескування внаслідок збудження рідини в резервуарі, яка має пружну структуру, що сильно деформується, у середині розлому та землетрусу.

У роботах⁸² проведені дослідження показали, що для чотирьох типів заповнення резервуара максимальні напруження та деформації спостерігаються в елементах його стінки біля нижнього краю. У стінці зовнішньої (захисної) ємності була концентрація напружень біля патрубка для зливу палива.

⁸⁰ Hashimoto H., Hata Y., Kawamura K. Estimation of oil overflow due to sloshing from oil storage tanks subjected to a possible Nankai Trough earthquake in Osaka bay area. *J. Loss Prev. Process Ind.* 2017. Vol. 50. P. 337–346 [116]; Kim Y. Numerical simulation of sloshing flows with impact load. *Appl. Ocean Res.* 2001. Vol. 23. P. 53–62 [117]; Celebi M. S., Akyildiz H. Nonlinear modeling of liquid sloshing in a moving rectangular tank. *Ocean Eng.* 2002. Vol. 29. P. 1527–1553 [118]; Chen Y., Xue M. A. Numerical simulation of liquid sloshing with different filling levels using OpenFOAM and experimental validation. *Water* 2018. Vol. 10. P. 1752 [119]; Cheng X., Cao L., Zhu H. Liquid-solid Interaction Seismic Response of an Isolated Overground Rectangular Reinforced-concrete Liquid-storage Structure. *J. Asian Archit. Build. Eng.* 2015. Vol. 14. P. 175–180 [120]; Yu C.-C., Whittaker A., Coleman J. Verification of a fluid-structure-interaction model for seismic analysis of Gen IV nuclear power plants. In *Proceedings of the 11th National Conference in Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute.* (Los Angeles, CA, USA. 25–29 June 2018). 2018 [121]; Waezi Z., Attari N.K.A., Rofooei F. R. Controlling the seismic response of structures under near-field earthquakes with fluid/structure interaction of cylindrical liquid tanks. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 2019. Vol. 23. P. 1–24 [122].

⁸¹ Dinger A. E. Investigation of the Sloshing Behavior Due to Seismic Excitations Considering Two-Way Coupling of the Fluid and the Structure. *Water* 2019. Vol. 11. P. 2664. URL: <https://doi.org/10.3390/w11122664> [123].

⁸² Lukianchenko O. O., Bouraou N. I., Kostina O. V., Kuzko O. V. Investigation of Static and Dynamic Characteristics of Complex Thin-Walled Shell Structure with Cracks. *Strength of Materials.* 2016. Vol. 48. Is. 3. P. 401–410 [124]; Rabinovich S. G. Measurement errors and uncertainties theory and practice. Third edition. Springer Science and Media, Inc. USA. 2005. 308 p. [125]; Bouraou N. I., Lukianchenko O., Tsybulnik S., Shevchuk D. Vibration condition monitoring of the vertical steel tanks. *Vibration in Physical Systems.* 2016. Vol. 27. P. 55–60 [126]; Bouraou N., Rupich S., Lukianchenko O., Kostina O. Monitoring of the Crack Propagation in Welded Joint of the Tank Using Multi-Class Recognition. *Vibrations in Physical Systems.* 2018. Vol. 29. P. 8 [127].

У лазерне сканування використовувалося для геометричного контролю резервуара⁸³.

У роботі Цибульника⁸⁴ визначено область виникнення небажаних напружень і пластичних деформацій, що відповідає швидкості повітряного потоку від 27,5 м/с до 54 м/с і максимальному тиску від 508 Па до розрахункового граничного значення $Wm=1924$ Па.

У попередніх публікаціях авторів⁸⁵ проведено дослідження нановключень композиційних матеріалів різної форми, які підвищують механічні властивості резервуарних матеріалів. Розглянуто нанокомпозити з алюмінієвою матрицею, що містить сталеві сферичні, сталеві циліндричні та вуглецеві вclusions. Результати розрахунків демонструють зміцнення отриманих композиційних матеріалів з одночасним зниженням питомої густини. Нанокомпозитні матеріали дозволяють полегшити будівництво вуглеводневих покладів, що важливо для нестаціонарних покладів.

Значна кількість робіт присвячена удосконаленню системи функціональної діагностики резервуарів⁸⁶, а також впливу динамічні та

⁸³ Rabinovich S. G. Measurement errors and uncertainties theory and practice. Third edition. Springer Science and Media, Inc. USA. 2005. 308 p. [125].

⁸⁴ Lukianchenko O. O., Bouraou N. I., Kostina O. V., Kuzko O. V. Investigation of Static and Dynamic Characteristics of Complex Thin-Walled Shell Structure with Cracks. *Strength of Materials*. 2016. Vol. 48. Is. 3. P. 401–410 [124]; Rabinovich S. G. Measurement errors and uncertainties theory and practice. Third edition. Springer Science and Media, Inc. USA. 2005. 308 p. [125]; Bouraou N. I., Lukianchenko O., Tsybulnik S., Shevchuk D. Vibration condition monitoring of the vertical steel tanks. *Vibration in Physical Systems*. 2016. Vol. 27. P. 55-60 [126]; Bouraou N., Rupich S., Lukianchenko O., Kostina O. Monitoring of the Crack Propagation in Welded Joint of the Tank Using Multi-Class Recognition. *Vibrations in Physical Systems*. 2018. Vol. 29. P. 8 [127].

⁸⁵ Sierikova O., Strelnikova E., Degtyarev K. Strength Characteristics of Liquid Storage Tanks with Nanocomposites as Reservoir Materials. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2022. P. 151-157. URL: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916369> [128].

⁸⁶ Ewald V., Ochôa P., Groves R., Boller C. Design of a structural health monitoring system for a damage tolerance fuselage component. *Proceedings of the 7th International Symposium on NDT in Aerospace*. 2015. P. 17–19 [129]; Amir Siddiq M. Deformation and failure in nanomaterials via a data driven modelling approach. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*. 2020. Vol. 10. Is. 4. P. 249–252 [130]; Vambol S., Vambol V., Suchikova Y., Deyneko N. Analysis of the ways to

кліматичні навантаження на резервуари рідких вуглеводнів⁸⁷. Проте вплив вібрації на рідкі вуглеводневі пласти вивчено недостатньо.

Аналіз досліджень, присвячених проблемам плескання рідини в резервуарах, надано в роботах Р. А. Ібрагіма⁸⁸. Відзначимо також роботи, присвячені плесканню рідини в циліндричних резервуарах під дією сейсмічних навантажень⁸⁹.

Розвиток міст та промисловості призводить до освоєння територій із складними геотехнічними умовами. У таких умовах ускладнюється можливість забезпечення проектних технологічних вимог при експлуатації екологічно небезпечних об'єктів за рахунок нерівномірних деформацій основи фундаментів. Тому необхідним є розроблення нових оцінок впливу природних та техногенних факторів на техногенні об'єкти, нових технологій та заходів, які б мінімізували ризики й забезпечили безаварійну експлуатацію сучасних екологічно небезпечних об'єктів, особливо у складних геотехнічних умовах⁹⁰.

При проектуванні резервуарів для зберігання нафтопродуктів, які є об'єктами екологічної безпеки, згідно з діючими нормами⁹¹

provide ecological safety for the products of nanotechnologies throughout their life cycle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 1. № 10–85. P. 27–36 [131].

⁸⁷ Bouraou N. I., Lukianchenko O., Tsybulnik S., Shevchuk D. Vibration condition monitoring of the vertical steel tanks. *Vibration in Physical Systems*. 2016. Vol. 27. P. 55-60 [126]; Bouraou N., Rupich S., Lukianchenko O., Kostina O. Monitoring of the Crack Propagation in Welded Joint of the Tank Using Multi-Class Recognition. *Vibrations in Physical Systems*. 2018. Vol. 29. P. 8 [127].

⁸⁸ Ibrahim R. A., Pilipchuck N., Ikeda T. Recent Advances In Liquid Sloshing Dynamics. *Applied Mechanics Reviews*. 2001. Vol. 54. № 2. P. 133–199. URL: <https://doi.org/10.1115/1.3097293> [132]; Ibrahim R. A. Liquid Sloshing Dynamics. Cambridge University Press, New York. 2005 [133].

⁸⁹ Ventsel E., Naumenko V., Strelnikova E., Yeseleva E. Free vibrations of shells of revolution filled with a fluid. Engineering analysis with boundary elements. 2010. Vol. 34. P. 856–862. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2010.05.004> [134].

⁹⁰ Серікова О. М. Вплив резервуарів для збереження отруйних та легкозаймистих рідин на навколишнє середовище. Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали та програма VII Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Суми, 21–24 квітня 2020 р.). 2020. С. 238-239 [135].

⁹¹ ДБН В.1.1-12:2014 Будівництво у сейсмічних районах України. Київ :

необхідно враховувати 1%-ну імовірність перевищення розрахункової інтенсивності сейсмічних впливів протягом 50 років. Цей фактор також суттєво підвищує ризики безаварійної експлуатації та відповідно вартість і складність будівництва цих інженерних споруд, оскільки доводиться виконувати додаткові розрахунки та розробляти відповідні конструктивні рішення щодо мінімізації ризиків при їх аваріях у разі землетрусу.

Ступінь пошкодження екологічно небезпечного об'єкта під час землетрусу залежить не лише від рівня сейсмічних впливів, але і від якості сейсмостійкого проектування і будівництва⁹².

Згідно ДСТУ⁹³ фундаментне кільце розраховують на основну комбінацію навантажень, а для будівельних майданчиків із сейсмічністю 7 балів і вище – на особливу комбінацію навантажень. Таким чином, можливість впливу менших але більш частих та тривалих сейсмічних навантажень, викликаних техногенними та природними факторами, не враховано достатньо при проектуванні резервуарів для збереження екологічно небезпечних рідин.

1.8. Екологічна небезпека процесу зберігання рідких вуглеводнів в резервуарах

Резервуарні парки є основним місцем зберігання сирової нафти і нафтопродуктів на нафтопереробних заводах, перевантажувальних і

Мінрегіонбуд України, 2014. 110 с. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-1083#load> [9].

⁹² Кендзера А. О., Семенова А. Ю. Моделювання впливу ґрунтової товщі на параметри сейсмічної небезпеки. *Світ геотехніки*. 2017. № 3 (55). С. 4–14 [136]; Старостенко В., Кендзера О., Сафронов О. Основні напрямки розвитку геофізичних досліджень у галузі оцінки сейсмічної небезпеки території України. *Вісник Київського національного ун-ту ім. Тараса Шевченка: Геологія*. 2011. № 52 [137]; Кендзера А. О., Семенова А. Ю. Моделювання впливу ґрунтової товщі на параметри сейсмічної небезпеки. *Світ геотехніки*. 2017. № 3 (55). С. 4–14 [138].

⁹³ Шимановський О., Адріанов В., Волков І., Гордєєв В., Гром А., Собко А. ДСТУ Б В.2.6-183:2011 «Резервуари вертикальні циліндричні сталеві для нафти та нафтопродуктів. Загальні технічні умови (ГОСТ 31385-2008, NEQ)». *Мінрегіон України*. 2012. 81 с. [139].

розподільчих базах, підприємствах автомобільного транспорту, залізничного, водного і повітряного транспорту. Скупчення легкозаймистих і горючих рідин на порівняно невеликій площі резервуарного парку призводить до підвищення екологічної та пожежної небезпеки таких виробництв. Можливий витік небезпечної рідини та розгерметизація резервуарів негативно впливає на стан навколишнього середовища.

Зберігання нафти і нафтопродуктів є важливою ланкою в комплексній системі видобутку-зберігання-транспортування нафти та її продуктів. Під час зберігання нафта і нафтопродукти, потрапляючи в навколишнє середовище, як правило, забруднюють газову оболонку, ґрунт, поверхневі та підземні води, погіршуючи їх санітарно-гігієнічний стан. Це триватиме до перегляду політики розвитку природних ресурсів, насамперед видобутку та переробки нафти, а також зберігання нафтопродуктів⁹⁴.

Наслідки зберігання нафти та нафтопродуктів визначено не лише просторово, а й у часі.

Внаслідок забруднення ґрунтів нафтою відбувається: порушення екологічної рівноваги в ґрунтовій системі; зміна морфологічних, фізичних, хімічних і біологічних характеристик ґрунту та структури ґрунтового профілю; порушення природного співвідношення між окремими групами і фракціями органічної речовини ґрунту;

⁹⁴ Шевчик Л. З., Романюк О. І. Використання обліпихи крушиновидної для фітореMediaції нафтозабруднених ґрунтів. *Biological Bulletin of Bogdan Chmelnytskyi Melitopol State Pedagogical University*. 2016. Vol. 6(3). P. 472–480 [140]; Шевчик-Костюк Л. З., Романюк О. І., Ощাপовський І. В. (2022). Особливості забруднення ґрунтів нафтою та нафтопродуктами: огляд. *Acta Biologica Ukrainica*. 2022. (1). С. 32-40. URL: <https://doi.org/10.26661/2410-0943-2022-1-04> [141]; Шевчик Л., Джура Н., Романюк О., Цвілинюк О., Терек О. Вплив абіотичних факторів на випаровування нафти з ґрунту. *Молодь і поступ біології: збірник тез VIII міжнар. конф. студентів та аспірантів* (Львів, 3-6 квітня 2012 р.). 2012. С. 182–183 [142]; Шевчик Л., Романюк О. Дослідження деяких закономірностей впливу нафти на початкові ростові параметри рослинних тест-об'єктів. *Вісник Львівського університету. Серія біологічна*. 2014. 67. С. 129–137 [143]; Шевчик Л. З., Джура Н. М., Романюк О. І. Терек О. І. Вплив абіотичних факторів і фітореMediaнтів на біодеградацію нафти у ґрунті. *Захист навколишнього середовища. Збалансоване природокористування: Матер. третьої міжнар. студ. наук.-практ. конф.* (Львів, 16-17 листопада 2010 р.). 2010. С. 60-62 [144].

проникнення нафти і нафтопродуктів у підземні води; зниження родючості ґрунту та виникнення токсикологічно небезпечних ситуацій. У біогеохімічному впливі нафти на екосистеми беруть участь багато вуглеводних і неуглеводних компонентів, у тому числі мінеральні солі та мікроелементи. Токсична дія одних компонентів може бути нейтралізована присутністю інших, причому токсичність суміші вуглеводнів вище, ніж токсичність окремих її компонентів, тому токсичність нафти не визначається токсичністю окремих сполук, що входять до її складу. . Необхідно оцінювати дію комплексу сполук в цілому. Оцінку екологічної небезпеки забруднення слід проводити не тільки за результатами вимірювань концентрацій нафтопродуктів, а й з урахуванням впливу забруднення на ґрунтову екосистему-біоценоз, на нормальне функціонування якої інтенсивність Від процесів самовідновлення значною мірою залежить якість ґрунтового покриву.

Ємності для зберігання рідин є важливими частинами промислових об'єктів і систем громадського водопостачання. Пошкодження резервуарів внаслідок землетрусу в сейсмонезбезпечних регіонах може призвести до серйозних соціальних, економічних та екологічних проблем, оскільки вони використовуються для зберігання важливих рідин, таких як вода для пиття та пожежогасіння, нафтопродукти та добрива. Крім того, вихід з ладу таких резервуарів призводить до руйнівних наслідків, зокрема до знищення рибної промисловості, забрудненню поверхневих водних об'єктів, отруєнню джерел питного водопостачання та проблем зі здоров'ям, що впливає на європейські переваги у захисті навколишнього середовища та безпеці для здоров'я населення. Однак сейсмічна реакція резервуарів для зберігання рідин є дуже нелінійною та набагато складнішою, ніж передбачається в поточних стандартах проектування, включаючи європейські.

Сейсмічні положення підйому бази резервуарів мають дуже мало технічної перевірки, стають менш точними зі збільшенням водотоннажності і, як правило, не включені в коди. Література про сейсмічні характеристики резервуарів вказує на те, що існує нагальна потреба оцінити застосовність поточних сейсмічних положень і розробити інструменти для розрахунку підйому основи резервуара та його впливу на сейсмічні характеристики резервуарів. Це головна мета запропонованого дослідження. Будуть розроблені та перевірені детальні 3D-моделі кінцевих елементів резервуару (FE), які враховують

взаємодію рідини та структури. Моделі FE використовуватимуться для дослідження сейсмічних характеристик різних резервуарів для зберігання рідини з використанням великої кількості записів землетрусів за допомогою аналізу історії в часі. Буде проведено параметричне дослідження, включаючи вплив характеристик землетрусу, геометрії резервуара та рівня вмісту рідини, а також властивостей ґрунту на місці резервуара. Результати будуть використані для розрізнення ефектів окремих параметрів, оцінки адекватності механічних моделей пружинної маси та положень сейсмічного проектування резервуарів з різних міжнародних кодексів, а також розробки простих моделей для прогнозування підйому основи резервуара та його впливу на сейсмічні характеристики рідини⁹⁵.

1.8.1. Техногенний вплив на ґрунти

Враховуючи фізико-географічні умови України (клімат, типи і склад ґрунту, рослинність та ін.), а також характер землекористування, які впливають на процеси самоочищення у разі забруднення нафтопродуктами, В. І. Соловйов⁹⁶ пропонує прийняти такі ступені градації забруднення ґрунтів нафтою і нафтопродуктами (з урахуванням кларку): незабруднені – до 1,5 г/кг; слабо забруднені – від 1,5 до 5,0 г/кг; середньо забруднені – від 5,0 до 13,0 г/кг; сильно забруднені – від 13,0 до 25,0 г/кг; дуже сильно забруднені – більше 25,0 г/кг (Рисунок 1.4). Результати відповідного дослідження свідчать, що слабке забруднення може бути ліквідоване у процесі самоочищення ґрунту протягом наступних 2-3 років, середнє – протягом 4-5 років. Початком серйозного екологічного ушкодження є забруднення ґрунту нафтою в концентраціях, що перевищують 13 г/кг, оскільки за цих умов починається міграція нафтопродуктів у підземні води, істотно порушується екологічна рівновага у ґрунтовому біоценозі.

Інші автори відзначають, що в результаті викидів нафти це могло вплинути на обсяг пор в ґрунті, що згодом могло порушити повітро- і водообмін і перешкодити росту рослин. Забруднення ґрунту нафтопродуктами в багатьох роботах розглядається як серйозна екологічна проблема. З часом це призводить до підвищення водовідштовхувальних властивостей ґрунту та становить загрозу для

⁹⁵ Там само [140]; [141]; [142]; [143]; [144].

⁹⁶ Там само [140]; [141]; [142]; [143]; [144].

здоров'я людини. Проблеми забруднення ґрунтів і води нафтопродуктами та спричинених ними екологічних катастроф висвітлювалися в кількох інших роботах⁹⁷. Проблеми, що виникають, не існують окремо одна від одної. Вони співіснують, доповнюють одна одну, взаємозалежні. Поступово вони стають загальною проблемою, яка переходить на глобальний рівень.

Відомо, що нафта, потрапляючи в ґрунт і воду, приносить різноманітний набір хімічних сполук, які порушують існуючий біогеохімічний баланс в екосистемах. Змінено агрегатний стан навколишнього середовища, водно-повітряний режим, зміни структури ґрунту, вуглецево-азотного балансу, матеріалізовані зміни міграційної здатності окремих мікроелементів у ґрунті. Мікробіологічні властивості були змінені внаслідок тривалого впливу нафти на ґрунт. Зокрема, з'являються нові спеціалізовані форми мікроорганізмів, які здатні окислювати тверді парафіни, газоподібні вуглеводні і ароматичні вуглеводні. Вищі рослини загинули після забруднення ґрунту. Це підкреслює той факт, що нафта є одним із найнебезпечніших забруднювачів біосфери. Це складна суміш вуглеводнів та їх похідних, і кожну з цих сполук можна розглядати як самостійний токсикант.

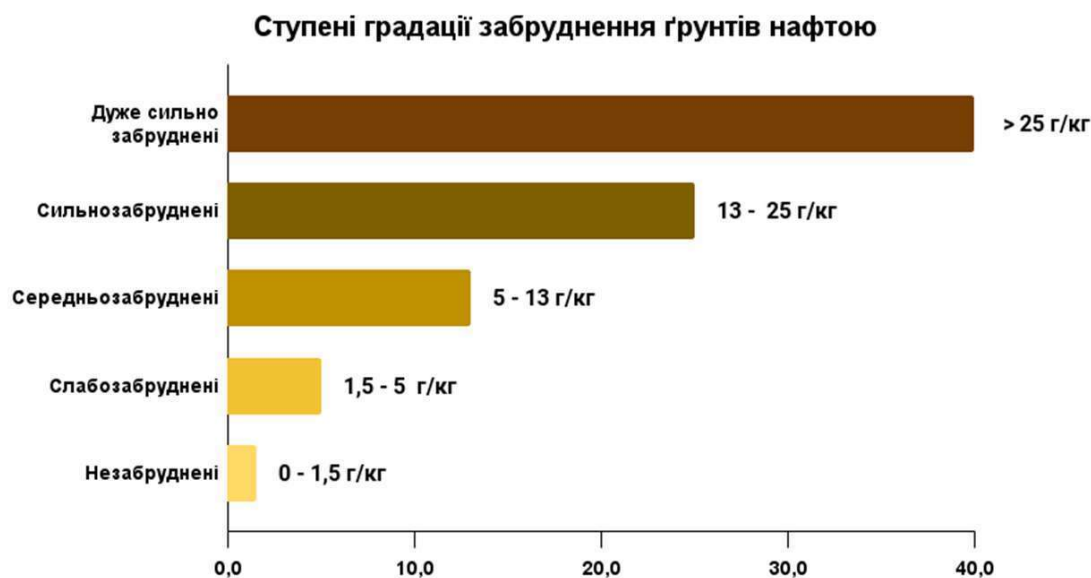


Рисунок 1.4 – Ступені градації забруднення ґрунтів нафтою.

⁹⁷ Там само [140]; [141]; [142]; [143]; [144].

Ґрунт відрізняється від інших об'єктів навколишнього природного середовища своїми фізичними, фізико-хімічними та хімічними властивостями, що потребує окремого вивчення особливостей і закономірностей його дестабілізації при забрудненні органічними та неорганічними забруднювачами. Ґрунт виконує роль буфера, завдяки чому є сорбентом, руйнівником і нейтралізатором більшості забруднюючих речовин. При надходженні нафти і нафтопродуктів в ґрунт їх міграція відбувається у вертикальному або радіально-латеральному напрямках. При латеральному розподілі вуглеводнів спостерігається перетікання по фільтраційних коридорах від ядра ареоли забруднення до периферії відповідно до нахилу місцевості. Усередині ґрунту відбувається перерозподіл нафтових фракцій по генетичних горизонтах залежно від їх питомої щільності та гранулометричного складу ґрунту, так званий «хроматографічний ефект».

Закономірності радіальної міграції речовин у ґрунті висвітлено в наступних роботах⁹⁸. Аналіз наукових робіт з вивчення розподілу вуглеводнів у ґрунті показує, що при постановці як модельних, так і польових дослідів в основному враховуються такі чинники: тип ґрунту, фракційний склад нафти або нафтошламу, глибина забруднення. проникнення. Результати досліджень у роботах⁹⁹ показують, що найбільш забруднений ґрунт поблизу джерел забруднення і що чим далі від джерела забруднення, тим менший вміст нафтових вуглеводнів у ньому. ґрунт. Вміст нафтових вуглеводнів зменшується із збільшенням глибини ґрунту внаслідок адсорбції ґрунтом. У науковій літературі наведено результати поодиноких дослідів, спрямованих на визначення залежності характеру та сили впливу нафтового забруднення на фізико-хімічні властивості та динаміку біохімічних процесів ґрунту від даних факторів.

Критичним для агрофізичних показників ґрунту є концентрація нафтового забруднення вже на рівні 15 %, що проявилось у заповненні порового простору, склеюванні ґрунтових агрегатів і, відповідно, зміні механічної структури. і порушення водно-повітряного режиму ґрунту.

⁹⁸ Янченко І. О., Аблєєва І. Ю. Забруднення підземних вод під час освоєння родовищ нафтогазовидобувного комплексу. Сучасні технології у промисловому виробництві: матер. VII Всеукр. наук.-техн. конф. (Суми, 21–24 квітня 2020 р.). Суми : Сумський державний університет, 2020. С. 159–160 [145].

⁹⁹ Там само [145].

При попаданні нафти в ґрунт знижується водопроникність ґрунту, різко зростає співвідношення між вуглецем і азотом, зменшується вміст рухомих форм калію, фосфору, азоту, кількість обмінних катіонів і величина катіонного обміну. потужність - ЕСО зменшення. Внаслідок цього погіршується водний, повітряний і поживний режими, внаслідок чого порушується кореневе живлення рослин, гальмується їх ріст, внаслідок чого не відновлюється родючий шар землі протягом довгий час.

Крім того, масло сприяє зміні фракційного складу гумусу, що виражається в зниженні концентрації гумінових кислот і збільшенні частки негідролізованих залишків - гуміну і гуміноподібних речовин, лігніну, терпенів, воскосмоли і бітуми. Забруднення ґрунтів нафтою не тільки порушує фізико-хімічні властивості, але й згубно впливає на живі істоти, руйнуючи природний баланс екосистем¹⁰⁰.

Ґрунти, забруднені вуглеводнями, мають як прямий вплив, пов'язаний з прямою токсичністю для живих організмів, так і опосередкований вплив на ґрунтову біоту, викликаний зміною параметрів середовища існування. Ґрунтові біоценози представлені переважно фіто-, зоо-, мікро- та мікоценозами. Мікроорганізми є екологічно важливою групою серед перелічених угруповань, оскільки вони відіграють визначальну роль у перебігу біохімічних процесів у ґрунті, виконуючи функцію редуцентів у трофічних співвідношеннях.

¹⁰⁰ Шевчик Л. З., Романюк О. І. Використання обліпихи крушиновидної для фітореMediaції нафтозабруднених ґрунтів. *Biological Bulletin of Bogdan Chmelnytskyi Melitopol State Pedagogical University*. 2016. Vol. 6(3). P. 472–480 [140]; Шевчик-Костюк Л. З., Романюк О. І., Ощеповський І. В. (2022). Особливості забруднення ґрунтів нафтою та нафтопродуктами: огляд. *Acta Biologica Ukrainica*. 2022. (1). С. 32-40. URL: <https://doi.org/10.26661/2410-0943-2022-1-04> [141]; Шевчик Л., Джура Н., Романюк О., Цвілинюк О., Терек О. Вплив абіотичних факторів на випаровування нафти з ґрунту. *Молодь і поступ біології: збірник тез VIII міжнар. конф. студентів та аспірантів* (Львів, 3-6 квітня 2012 р.). 2012. С. 182–183 [142]; Шевчик Л., Романюк О. Дослідження деяких закономірностей впливу нафти на початкові ростові параметри рослинних тест-об'єктів. *Вісник Львівського університету. Серія біологічна*. 2014. 67. С. 129–137 [143]; Шевчик Л. З., Джура Н. М., Романюк О. І. Терек О. І. Вплив абіотичних факторів і фітореMediaнтів на біодеградацію нафти у ґрунті. *Захист навколишнього середовища. Збалансоване природокористування: Матер. третьої міжнар. студ. наук.-практ. конф.* (Львів, 16-17 листопада 2010 р.). 2010. С. 60-62 [144].

Окремі штами бактерій і нижчих грибів сприяють мінералізації органічних речовин, залученню біогенних елементів у біогеохімічні цикли, використовуючи їх у власних метаболічних процесах. Збільшення кількості вуглеводнів у ґрунті призводить до зменшення видового різноманіття та зменшення кількості організмів, більш чутливих і менш стійких до токсичної дії органічних сполук, що надходять. Встановлено, що навіть мінімальна концентрація нафти в ґрунті сприяє пригніченню процесів енергетичного та пластичного обміну нітрифікаторів. Коливання чисельності цієї групи мікроорганізмів виявлені як тест-реакції в методах біоіндикації нафтових забруднень. У той же час спостерігається збільшення популяцій бактерій, які спеціалізуються на руйнуванні нафти, яке здійснюється за допомогою синтезованих ендферментів.

Домінуючими видами стають популяції вуглеводнеоокислюючих мікроорганізмів. Динаміка угруповань визначається обмежуючими факторами, головним чином вмістом вуглецю в навколишньому середовищі, і описана відповідно до закону толерантності Шелфорда. Забруднення ґрунту нафтою супроводжувалося 75 закономірними змінами еколого-трофічних груп мікроорганізмів, у результаті чого в групі виникають конкурентні відносини, які характеризуються наступними взаємодіями: за низького та середнього рівнів забруднення – конкуренція за типом нестійкої рівноваги; при високому рівні забруднення - обов'язкова заміна. За даними¹⁰¹, сира нафта впливає на проростання та ріст деяких рослин.

Забруднення ґрунту сировою нафтою впливає на певні параметри ґрунту, такі як вміст мінеральних і органічних речовин, здатність до катіонного обміну, окисно-відновні властивості та значення рН. Ойедеджі А. та інші відзначають високе накопичення токсичних для росту рослин іонів алюмінію та марганцю в результаті анаеробного стану в ґрунті в поєднанні з перезволоженням та накопиченням кислих метаболітів. Результати, отримані¹⁰², свідчать про те, що діапазон концентрацій окремих поліциклічних ароматичних вуглеводнів на рівні 20–100 мг/кг є токсичним для видів, що мешкають у ґрунті. Властивості ґрунту також можуть впливати на концентрацію, при якій можуть спостерігатися певні екотоксикологічні ефекти. Отримані в результаті

¹⁰¹ Там само [140]; [141]; [142]; [143]; [144].

¹⁰² Там само [140]; [141]; [142]; [143]; [144].

досліджень дані свідчать про те, що ґрунти з високим вмістом органічних речовин токсичні при концентраціях, які в 2-8 разів перевищують концентрацію для ґрунтів з низьким вмістом органічних речовин.

Нафтове забруднення є одним із найнебезпечніших видів забруднення навколишнього середовища. Його негативний вплив на ґрунтово-рослинний покрив, атмосферне повітря, поверхневі та підземні води, здоров'я людини позначається на всіх етапах промислової розробки нафтових родовищ: буріння, обробки, зберігання, транспортування та ліквідації обладнання. Найбільше страждають водні та наземні екосистеми. Серед компонентів наземних екосистем нафта в першу чергу забруднює ґрунт.

Завдяки високій адсорбуючій здатності нафта та нафтопродукти зберігаються в ньому тривалий час, спричиняючи як деградацію земель, так і створюючи небезпеку потрапляння забруднюючих речовин у харчові ланцюги, однією з ланок яких є людина. Природне самоочищення ґрунту – довготривалий і складний процес, який не завжди закінчується повним відновленням ґрунтової екосистеми. Нафта являє собою рідкий природний розчин, що складається з великої кількості вуглеводнів різної будови і високомолекулярних смолисто-асфальтенових речовин. До його складу входять майже 3000 інгредієнтів, більшість з яких легко окислюються.

Основними нафтоутворюючими компонентами є вуглець (83-87 %), водень (12-14 %), азот, сірка, кисень (1-2 %, рідше 3-6 % за рахунок сірки). Десяті і соті частки відсотка олії складають мікроелементи. В якості еколого-геохімічних характеристик основного складу нафти прийнято вміст: легкої фракції (температура кипіння 200°C), метанових вуглеводнів (включаючи тверді парафіни), циклічних вуглеводнів, смол, асфальтенів і сполук сірки. До складу легкої фракції входять найпростіші низькомолекулярні вуглеводні: метанові (алкани), нафтеніві (циклопарафіни) і 12 ароматичних.

Легка фракція нафти найбільш рухлива і токсична. Він мігрує по ґрунтовому профілю та водоносним горизонтам, значно розширюючи зону первинного забруднення. Вуглеводні метану легкої фракції мають наркотичну та токсичну дію на живі організми. Особливо швидко діють алкани з коротким вуглеводневим ланцюгом. Ці вуглеводні краще розчиняються у воді, легко проходять у клітини організмів через мембрани. Передбачається, що пряму токсичну дію визначають легкі

фракції нафти. Через летючість і більшу розчинність низькомолекулярних алканів їх дія зазвичай нетривала. Зі зменшенням вмісту легкої фракції знижується токсичність нафти, але зростає токсичність ароматичних сполук, відносний вміст яких зростає.

До циклічних вуглеводнів у складі нафти входять нафтеніві (циклоалкани) і ароматичні (арени) вуглеводні. Найбільш токсичними є ароматичні вуглеводні, багато з них характеризуються вираженою мутагенністю та канцерогенністю.

Інформації про токсичність нафтенів майже немає. Водночас є дані про нафтени як стимулюючі речовини при дії на живі організми. Циклічні вуглеводні з насиченими зв'язками дуже важко окислюються. Біологічна деградація циклоалканів ускладнюється їх низькою розчинністю та відсутністю функціональних груп. Основними продуктами окислення нафтових вуглеводнів є кислоти і окисикислоти. У процесі ущільнення кислих продуктів могли частково утворюватися продукти окисної конденсації - вторинні смоли і невелика кількість асфальтенів. До високомолекулярних неуглеводневих компонентів нафти відносяться смоли і асфальтени. У його складі вони відіграють важливу роль, визначаючи фізичні властивості та хімічну активність.

Шкідливий екологічний вплив смоло-асфальтових сполук на ґрунт полягає не стільки в їх хімічній токсичності, скільки в зміні водно-фізичних властивостей ґрунту. Як правило, смоло-асфальтові компоненти сорбуються у верхньому, гумусовому горизонті, і при цьому зменшуються пори в ґрунті. Гідрофобні компоненти, що вкривають коріння рослин, різко погіршують надходження до них води та 13 поживних речовин, викликаючи їх загибель.

Потенційно екологічно небезпечними компонентами нафти є сполуки сірки, які значно підвищують її токсичність. При забрудненні нафтопродуктами відбувається порушення структурно-функціональних характеристик ґрунтової екосистеми, зниження продуктивності земель, зміна морфологічних характеристик, фізико-хімічних і біологічних властивостей ґрунту. Морфологічні зміни включають більш темне забарвлення порівняно з незабрудненим ґрунтом, високу щільність, наявність нафтових плівок, появу стовпчастої структури в нижній частині ґрунтового профілю, посилення зледеніння. У нафтозабруднених ґрунтах переважають чорні, сіро-бурі відтінки у верхній частині профілю та темно-бурі, буро-бурі, коричнево-вохристі – у нижній частині.

Зміна кольору поверхні ґрунту внаслідок огортання частинок ґрунту масляною плівкою призводить до зниження її спектрального коефіцієнта відбивання. Зміна кольору забрудненого ґрунту також сприяє його більшому прогріванню. Характер розподілу нафти і нафтопродуктів у ґрунтовому профілі залежить від властивостей ґрунту та складу нафти – співвідношення високомолекулярних і низькомолекулярних компонентів. Вертикальне просування нафти по профілю ґрунту створює хроматографічний ефект диференціації складу нафти: у верхньому, гумусовому горизонті сорбуються високомолекулярні компоненти, які містять багато смолисто-асфальтенових речовин і циклічних сполук; в основному в нижні горизонти проникають низькомолекулярні сполуки, які мають вищу розчинність у воді, ніж високомолекулярні.

В умовах лабораторних досліджень встановлено, що основними процесами, які визначають міграцію вуглеводнів, є сорбція та водопроникність ґрунту. Із збільшенням щільності ґрунту збільшується кількість адсорбованої нафти. Із збільшенням вологості ґрунту сорбція нафти зменшується, але збільшується глибина її вертикальної міграції. При попаданні нафти в 14 ґрунт піщаного гранулометричного складу спостерігається її активна міграція з подальшим накопиченням в нижніх горизонтах, а також виділенням в ґрунт і підземні води. Повідомляється, що на території нафтопромислів глибина забруднення ґрунту нафтою сягає понад 1,5 м. Витоки нафтопродуктів з високим вмістом важких фракцій вуглеводнів утворюють на поверхні ґрунту щільну в'язку бітумінозну кірку. Ґрунти, насичені нафтопродуктами, втрачають здатність поглинати та утримувати вологу, характеризуються нижчими значеннями гігроскопічної вологи, водопроникності та вологості.

Внаслідок забруднення нафтою змінюється кількість і співвідношення макро- і мікроелементів. Зокрема, різко зростає співвідношення між вуглецем і азотом за рахунок нафтового вуглецю, який погіршує азотний режим ґрунтів. Крім того, масло негативно впливає на бактерії, які беруть участь в кругообігу азоту. Сорбція олії на частинках ґрунту перешкоджає міграції рухомих форм елементів живлення: азоту, фосфору та калію в розчині, що знижує доступність елементів мінерального живлення для рослин.

Забруднення нафтою призводить до перебудови ґрунтового поглинального комплексу, що призводить до зміщення лужно-кислого стану ґрунту - засолення початково кислих і слабокислих ґрунтів або

підкислення близьких до нейтральних і нейтральних ґрунтів на 0,1-Спостерігається 0,3 одиниці рН. При забрудненні нафтою спочатку нейтрального алювіального ґрунту спостерігається підкислення ґрунтового розчину на 0,8-1,6 одиниць рН. У ґрунтах нафтопромислів відзначається підвищення концентрації важких металів. Зокрема, дослідники вказують на перевищення фонового вмісту As, Pb, Cu, Zn, V та Ni. Біологічні властивості ґрунтів також різко змінюються у відповідь на забруднення нафтою. Спостерігається зниження активності 15 більшості ґрунтових ферментів. Проте є публікації, які свідчать про підвищення активності каталази, дегідрогенази, уреаз, інвертази. Повідомлялося, що ароматичні вуглеводні пригнічують активність ферментів, тоді як парафінові активують їх¹⁰³.

Зміна активності ґрунтових ферментів зазвичай корелює з чисельністю мікроорганізмів. Вплив вуглеводневих масел на мікроорганізми відбувається через трансформацію фізико-хімічних властивостей ґрунту: зниження забезпеченості елементами мінерального живлення, погіршення водно-повітряного режимів, зміну реакції ґрунтового середовища та структури ґрунту, безпосереднє токсична дія, пов'язана в першу чергу з леткими ароматичними вуглеводнями (бензол, толуол, ксилол та ін.), нафталіном і деякими іншими водорозчинними сполуками.

¹⁰³ Шевчик Л. З., Романюк О. І. Використання обліпихи крушиновидної для фітореMediaції нафтозабруднених ґрунтів. *Biological Bulletin of Bogdan Chmelnytskyi Melitopol State Pedagogical University*. 2016. Vol. 6(3). P. 472–480 [140]; Шевчик-Костюк Л. З., Романюк О. І., Ощиповський І. В. (2022). Особливості забруднення ґрунтів нафтою та нафтопродуктами: огляд. *Acta Biologica Ukrainica*. 2022. (1). С. 32-40. URL: <https://doi.org/10.26661/2410-0943-2022-1-04> [141]; Шевчик Л., Джура Н., Романюк О., Цвілинюк О., Терек О. Вплив абіотичних факторів на випаровування нафти з ґрунту. *Молодь і поступ біології: збірник тез VIII міжнар. конф. студентів та аспірантів* (Львів, 3-6 квітня 2012 р.). 2012. С. 182–183 [142]; Шевчик Л., Романюк О. Дослідження деяких закономірностей впливу нафти на початкові ростові параметри рослинних тест-об'єктів. *Вісник Львівського університету. Серія біологічна*. 2014. 67. С. 129–137 [143]; Шевчик Л. З., Джура Н. М., Романюк О. І. Терек О. І. Вплив абіотичних факторів і фітореMediaнтів на біодеградацію нафти у ґрунті. *Захист навколишнього середовища. Збалансоване природокористування: Матер. третьої міжнар. студ. наук.-практ. конф.* (Львів, 16-17 листопада 2010 р.). 2010. С. 60-62 [144].

Аналіз публікацій показав неоднозначний вплив нафти на комплекс ґрунтових мікроорганізмів. Таким чином, забруднення нафтою стимулює ріст одних видів і пригнічує розвиток інших, що залежить від концентрації та складу забруднювача та біологічних особливостей організмів. Найбільш чутливі до забруднення нафтою актиноміцети, нітрифікатори, целюлозоруйнуючі мікроорганізми. На відміну від зменшення чисельності або повної втрати найбільш чутливих елементів ґрунтового мікробного співтовариства, спостерігається збільшення чисельності нафтоокислюючих мікроорганізмів і мікроміцетів, які використовують вуглеводневі олії як живильний субстрат.

В інших роботах повідомляється про збільшення чисельності фітопатогенних і фітотоксичних ґрунтових грибів, накопичення потенційно небезпечних і алергенних для людини видів. Альгофлора ґрунту реагує на забруднення нафтою приблизно так само, як і мікрофлора. Низька концентрація сирової олії (0,01 %) стимулює ріст зелених водоростей *Chlorella homosphaera* і *Chlorella vulgaris* (на 16 і 15 %), а більша концентрація (0,3 %) викликає значне зниження (15 і 20 %) чисельності. Найбільш стійкими до нафтопродуктів виявилися представники синьозелених водоростей, або ціанобактерій, які домінували на забруднених ґрунтах: види *Nostoc punctiforte*, *Nostoc linckia*, *Anabaena oscillarioides*, *Phormidium autumnale*, *Plectonema gracillimum*. Є припущення, що ціанобактерії здатні засвоювати вуглеводневі масла.

Мезофауна (дощові черв'яки, багатоніжки, молюски, дорослі особини та личинки комах) вважається одним із найбільш чутливих компонентів екосистем до вуглеводневого забруднення ґрунтів. Найбільш чутливими виявилися молюски, а найстійкішими – багатоніжки з класу *Chilopoda*, здатні виживати в районах із забрудненням нафтою більше 20 %. Проміжне місце займають дощові черв'яки, павуки та комахи¹⁰⁴.

У ґрунті можлива трансформація нафти в більш токсичні сполуки, які можуть адсорбуватися та накопичуватися в ній. У результаті такий ґрунт стає джерелом токсикантів, які надходять в організм людини через трофічні ланцюги: ґрунт – рослина – їжа, ґрунт – підземні води –

¹⁰⁴ Там само [140]; [141]; [142]; [143]; [144].

людина, ґрунт – атмосферне повітря – людина, що підвищує ризик виникнення екологічно зумовлених захворювань.

Небезпечним вважається рівень забруднення ґрунту, що перевищує межу потенціалу самоочищення. Іншими словами, ґрунти вважаються забрудненими, коли концентрація нафтопродуктів у них досягає такого значення, що починаються негативні екологічні зміни в навколишньому середовищі: порушується екологічна рівновага в ґрунтовій екосистемі, гине ґрунтова біота, падає врожайність або загибель рослин, відбувається зміна морфології, водно-фізичних властивостей ґрунтів, знижується їх родючість, створюється небезпека забруднення підземних і поверхневих вод. Тому першочерговим завданням під час аналізу рівня забруднення ґрунтів є визначення допустимих або безпечних норм вмісту цього виду забруднення.

Основна проблема полягає в тому, що таких загальноприйнятих стандартів не існує. У Європі верхня безпечна норма вмісту нафтопродуктів у ґрунті становить 1-3 г/кг, а початок серйозної екологічної шкоди – 20 г/кг і вище. У країнах ближнього зарубіжжя гранично допустимі концентрації (ГДК) нафтопродуктів у ґрунті не розроблені, за винятком Татарстану (Росія). Для Татарстану ГДК нафтопродуктів у ґрунті становить 1,5 г/кг, що відповідає транслокаційному (фітоаккумулятивному) показнику шкідливості. Використовують також індекс шкідливості міграційної води (13,1 г/кг), міграційного повітря (більше 5 г/кг) і загальносанітарної (більше 5 г/кг). В Україні ГДК для нафти та продуктів її переробки в ґрунті не визначено, є лише посилання на орієнтовно допустиму концентрацію (ОДК) 0,2 мг/кг. В інших джерелах ОДК для ґрунту визначається як 4 г/кг, що широко використовується для аналізу забруднення ґрунту нафтопродуктами. Орієнтація на цей показник не може гарантувати отримання об'єктивних оцінок, особливо з огляду на те, що вміст нафтових вуглеводнів у ґрунті в європейських країнах за Кларк коливається в межах 0,01-0,5 г/кг, а у великих містах України показники досить поширені 1-3 г/кг. На територіях, прилеглих до підприємств переробки, видобутку та зберігання нафтопродуктів, фон сягає 6 г/кг.

1.8.2. Техногенний вплив на підземні води

Для охорони підземних вод від забруднення застосовуються спеціальні заходи як для запобігання забрудненню, так і для локалізації або ліквідації забруднення підземних вод, яке вже утворилося в товщі води. Для цього використовуються інженерні споруди, схема, тип і конструкція яких залежать від гідрогеологічних умов, виду джерела забруднення, масштабів забруднення, а також характеру і значення об'єкта захисту: водоносного горизонту в цілому, індивідуальні водозабори підземних вод, поверхневі водотоки та ін. Вид спеціальних захисних заходів для боротьби із забрудненням підземних вод слід вибирати за результатами розробки техніко-економічного обґрунтування проекту захисту, порівнюючи, з одного боку, кількість шкоди, спричиненої забрудненням підземних вод, і, з іншого боку, вартості різних варіантів захисту природного середовища.

Тільки виходячи з масштабів споживання нафти і нафтопродуктів, можна оцінити екологічну шкоду, завдану природі внаслідок природних втрат. Тому охорона навколишнього середовища повинна оцінювати ефективність засобів і методів, що зменшують втрати нафтопродуктів під час операцій зберігання, приймання та відвантаження, а також методів зберігання, які виключають випаровування нафтопродуктів. Звичайно, неможливо дати реальну (вартісну) оцінку екологічної шкоди. Усі оцінки умовні¹⁰⁵.

Вирішення проблеми рекультивації земель і водних ресурсів забруднених нафтопродуктами територій часто ускладнюється надзвичайно високим рівнем їх забруднення, що перешкоджає життєдіяльності вуглекиснювальних бактерій і природному самоочищенню. У зв'язку з цим в кожній конкретній ситуації в залежності від масштабів і характеру поширення забруднення розробляється оптимальна технологія рекультивації підземних порід і підземних вод, що містяться в них.

Існуючі методи очищення геологічного середовища від нафтових забруднень характеризуються двома принципово різними

¹⁰⁵ Янченко І. О., Аблєєва І. Ю. Забруднення підземних вод під час освоєння родовищ нафтогазовидобувного комплексу. Сучасні технології у промисловому виробництві: матер. VII Всеукр. наук.-техн. конф. (Суми, 21–24 квітня 2020 р.). Суми : Сумський державний університет, 2020. С. 159–160 [145].

технологічними підходами. Перший підхід полягає в тому, що саме очищення передбачає пряме видалення забруднюючих речовин із геологічного середовища. Другий підхід заснований на інактивації (детоксикації) забруднювача шляхом нейтралізації, розкладання, зв'язування, локалізації тощо.

В даний час розробка технологій очищення геологічного середовища від нафтових забруднень спрямована на підвищення ефективності і зниження витрат. Це визначає основні вимоги до методів очищення, а саме можливість використання *in situ* методу, в тому числі на значній глибині, вибірковість методу щодо певних екотоксикантів, екологічну чистоту технологій та відсутність негативних побічних ефектів в екосистемах, відносно висока ступінь і швидкість очищення.

Виходячи з виявлених закономірностей розподілу нафтопродуктів у геологічному середовищі, рекомендації щодо екологічного оздоровлення території такі:

- відкачування розчинених нафтопродуктів, накопичених на рівні ґрунтових вод;
- очищення території від нафтового забруднення має відбуватися за рахунок аборигенної мікрофлори з внесенням поживних речовин та аерацією через наявні та додатково пробурені свердловини;

Цю процедуру необхідно повторити за наявності аналітичного контролю стану твердої та рідкої фаз геологічного середовища¹⁰⁶.

1.8.3. Забруднення атмосферного повітря

Основну частку втрат складають пари нафтопродуктів при їх зберіганні. Світові статистичні дані свідчать, що втрати нафти і нафтопродуктів на випаровування становлять від 0,5 до 1,7 % від загального обсягу переробленої сировини, тоді як в Україні вони значно вищі і становлять 3-7 %.

Безпосередніми джерелами забруднення навколишнього середовища є сховища нафти і нафтопродуктів. У процесі дихання «великих» і «малих» резервуарів і випаровування парів атмосферне повітря забруднюється. Крім того, основні джерела викидів вуглеводнів

¹⁰⁶ Там само [145].

включають завантажувальні пристрої та неконтрольовані джерела, включаючи ущільнення компресора та насоса, клапани, включаючи запобіжні клапани, фланці, сепаратори масла/води, барометричні конденсатори тощо. Залежно від початкової конструкції, технічного обслуговування та належних стандартів управління, значний викид може бути значним джерелом викидів вуглеводнів на нафтопереробному заводі.

Нафтопродукти не є вибуховими речовинами. Вони не вибухають від капсуля-детонатора, під дією ударної хвилі або від тертя. Однак при змішуванні парів з повітрям можливе утворення вибухонебезпечних і пожежонебезпечних сумішей, займання і горіння яких, особливо в закритих об'ємах, є вибухонебезпечним через швидкість поширення полум'я і тиску.

Розрізняють наступні типи випаровування з резервуарів: пари від «великого вдиху» - утворюються при витісненні пароповітряної суміші з газового простору (ГП) резервуара в атмосферу, утворену в резервуарі нафтопродуктом. Випаровування від «зворотного видиху» утворюються при витісненні пароповітряної суміші з газового простору резервуара в результаті підвищення парціального тиску парів бензину в газовому просторі в результаті надходження повітря в резервуар в процес відкачування з нього нафтопродукту. Значення вищезазначених випаровувань залежать від характеристик резервуару, типу нафтопродукту, кліматичних умов та умов проведення технологічних операцій.

«Велике дихання» відбувається при виштовхуванні пароповітряної суміші з бака в процесі заповнення його паливом, коли об'єм газового простору зменшується і спрацьовує дихальний клапан. Зворотне явище відбувається, коли повітря потрапляє в бак при зливі палива з бака. Обсяг «великого вдиху» відповідає кількості продукту, який надійшов у бак. Обсяг викидів в результаті «великого дихання» зростає зі збільшенням кількості циклів наповнення-спорожнення бака, а також залежить від кліматичної зони розташування. У загальному обсязі викидів шкідливих речовин близько 40 % складають «великі вдихи», які інколи створюють у робочій зоні максимально-разові концентрації, що перевищують нормативні¹⁰⁷.

¹⁰⁷ Адаменко М. І., Гарбуз С. В. Інформаційна модель розповсюдження забруднення атмосфери викидами із резервуарів з залишками нафтопродуктів

1.8.4. Вплив нафти на рослинність

Вплив нафтового забруднення на рослини відбувається двома шляхами: прямим шляхом, за рахунок проникнення компонентів нафти через кореневу систему або продихи листків і включенням їх в обмін речовин, і опосередкованим шляхом, за рахунок зміни фізико-хімічного складу ґрунту та, відповідно, порушення його біотичних властивостей. Проникнення компонентів рідких фракцій нафтопродуктів у рослинний організм через кореневу систему викликає мутагенні реакції, морфогенетичні та фенологічні відхилення від нормального розвитку. Встановлено, що низькі концентрації нафти в ґрунті (за різними даними до 5 %) не роблять істотного впливу або навіть можуть стимулювати ріст рослин, підвищуючи такі показники, як схожість, біомаса, довжина надземної або підземна частина, вміст хлорофілу в листі. При подальшому збільшенні вмісту рідких вуглеводнів в ґрунті починає проявлятися значний гнітючий ефект або повна загибель рослин.

Важливе значення мають роботи, спрямовані на вивчення впливу забруднення нафтою і нафтопродуктами на рослинні угруповання в природних умовах. Показано, що збереження ґрунтового покриву визначається глибиною проникнення нафти в ґрунт, а також глибиною розміщення в ґрунті 17 органів вегетативного розмноження рослин. Так, повідомляється, що при рівні забруднення 1,5 л/м² нафта проникає в лісову підстилку на глибину не більше 2 см, що викликає загибель лишайників, сходів сосни та кедра. Внесення олії в кількості 5 л/м² призводить до повного просочування лісової підстилки олією і викликає загибель не тільки мохів і лишайників, а й чагарників – брусниці та лохини. У дозах 10 і 20 л/м² нафта проникає в ґрунт на глибину до 20 см. Всі представники надпочвенного покриву відчувають сильне пригнічення, виживають лише окремі особини.

Концентрація нафти від 50 до 100 л/м² призводить до загибелі

під час їх провітрювання. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Сер.: Механіко-технологічні системи та комплекси. Харків: НТУ «ХПІ». 2016. № 17 (1189). С. 115–121 [103]; Sierikova O., Strelnikova E., Kriutchenko D. Membrane installation in storage tanks for seismic loads impact protection. *Acta Periodica Technologica*. 2023. Vol. (54). P. 209-222. URL: <https://doi.org/10.2298/APT2354209S>, Stofan A.J.; Sumner I.E. *Technical Note*; Natl. Aeronaut. SP. Adm. Ohio, Lowis Res. Center: Cleveland, OH, USA. 1963 [104].*

трав'яно-мохового покриву понад 98 %. За деякими даними, повна загибель трав'янистих рослин настає при об'ємі витоку 1,1 л/м², тобто вмісті олії 0,5 % у 15 см шарі ґрунту, а припинення росту рослин зазвичай спостерігається при вміст олії > 3500 мг/кг. що становить 0,35%. Внаслідок забруднення нафтою зменшується кількість видів рослин, загальне проективне покриття видів і продуктивність фітомаси, перебудовується видова структура ґрунтового покриву, змінюється співвідношення видів і груп рослин. У різних кліматичних умовах період відновлення рослинності на сильно забруднених ґрунтах може становити 10-20 років і більше¹⁰⁸.

1.9. Аналіз причин виникнення пожеж в резервуарах зберігання рідких вуглеводнів

Побудова сценаріїв виникнення та розвитку пожеж, що спричинили загибель людей. При наявності джерел займання можливе займання розлитих нафтопродуктів, горіння хмари, утворення вибухових концентрацій – вибух парів газу або спалах пожежі. Розгерметизація обладнання з нафтопродуктами на території за наявності джерела займання може призвести до миттєвого або

¹⁰⁸ Шевчик Л. З., Романюк О. І. Використання обліпихи крушиновидної для фітореMediaції нафтозабруднених ґрунтів. *Biological Bulletin of Bogdan Chmelnytskyi Melitopol State Pedagogical University*. 2016. Vol. 6(3). P. 472–480 [140]; Шевчик-Костюк Л. З., Романюк О. І., Ощиповський І. В. (2022). Особливості забруднення ґрунтів нафтою та нафтопродуктами: огляд. *Acta Biologica Ukrainica*. 2022. (1). С. 32-40. URL: <https://doi.org/10.26661/2410-0943-2022-1-04> [141]; Шевчик Л., Джура Н., Романюк О., Цвілинюк О., Терек О. Вплив абіотичних факторів на випаровування нафти з ґрунту. *Молодь і поступ біології: збірник тез VIII міжнар. конф. студентів та аспірантів* (Львів, 3-6 квітня 2012 р.). 2012. С. 182–183 [142]; Шевчик Л., Романюк О. Дослідження деяких закономірностей впливу нафти на початкові ростові параметри рослинних тест-об'єктів. *Вісник Львівського університету. Серія біологічна*. 2014. 67. С. 129–137 [143]; Шевчик Л. З., Джура Н. М., Романюк О. І. Терек О. І. Вплив абіотичних факторів і фітореMediaнтів на біодеградацію нафти у ґрунті. *Захист навколишнього середовища. Збалансоване природокористування: Матер. третьої міжнар. студ. наук.-практ. конф.* (Львів, 16-17 листопада 2010 р.). 2010. С. 60-62 [144].

уповільненого займання. Наслідками спалаху є «вогняна куля» та сценарії спалаху. Умовою виникнення «вогняної кулі» є наявність перегрітих нафтопродуктів, що теоретично можливо лише при попаданні в осередок пожежі цистерни з газом пропан-бутан («ефект доміно»). Характерні такі сценарії виникнення та розвитку пожеж:

I. Типовий сценарій, що призводить до розливу пожежі:

1. Розгерметизація обладнання з нафтопродуктами – надходження рідкої фази нафтопродуктів в навколишнє середовище – утворення розливу – наявність джерела запалювання – пожежа розливу нафти, дія теплового випромінювання на людей, прилеглі будівлі та споруди.

2. Вибух – швидке хімічне перетворення навколишнього середовища, що супроводжується виділенням енергії й утворенням стиснених газів.

II. Типовий сценарій, що призводить до вибуху парової фази нафтопродуктів:

1. Розгерметизація обладнання з нафтопродуктами – утворення розливу – випаровування з поверхні розливу – утворення хмари – поява вогнища запалювання – вибух ПГВ, вплив ударної хвилі на людей, прилеглі будівлі та споруди.

2. Спалахова пожежа – горіння хмари попередньо змішаної газопаро-повітряної суміші без виникнення хвиль тиску, небезпечних для людей і оточуючих предметів.

III. Типовий сценарій, який призводить до спалаху масляних парів:

1. Розгерметизація обладнання з нафтопродуктами – утворення розливу – випаровування з поверхні розливу – утворення хмари ПГФ – поява джерела запалювання – спалах пожежі, вплив теплового випромінювання на людей, будівлі та споруди.

За результатами аналізу небезпек побудовано сценарії розвитку аварії у вигляді дерева подій.

Пожежа в резервуарі – одна з найнебезпечніших надзвичайних ситуацій, яка може призвести не лише до значних матеріальних та екологічних збитків, а й до людських жертв. Ситуація ускладнюється також економічно обумовленою тенденцією до використання більших резервуарів, що значно збільшує об'єм легкозаймистих рідин на одиницю

площі. Це, в свою чергу, підвищує ризик перекидання пожежі на сусідні резервуари за відсутності своєчасної локалізації та ліквідації вогнища¹⁰⁹.

Небезпека вуглеводневих рідких пластів пов'язана з низкою причин, найбільш характерними з яких є:

- висока пожежна небезпека продуктів, що зберігаються,
- великі розміри конструкцій і пов'язана з ними довжина зварних швів, які важко контролювати по всій довжині,
- недосконалість геометричної форми, нерівномірне осідання фундаментів,
- великі рухи стінок, особливо в місцях геометричних спотворень форми конструкції,
- висока швидкість пошкодження корозією,
- малоциклова втома окремих зон стінки конструкції,
- комплексний характер навантаження конструкції в зоні вторинного шва в поєднанні з практичною відсутністю контролю цілісності цих зварних з'єднань¹¹⁰.

Руйнування резервуарів та їх елементів відбувається:

- пластичне руйнування, яке супроводжується значним розвитком пластичних деформацій при багаторазових навантаженнях в умовах змінної плинності та прогресуючого руйнування;
- крихке руйнування, яке супроводжується малою деформацією і виникає при зосередженні зон напружень, низьких температурах або ударних впливах, а в більшості випадків при одночасній дії зазначених факторів;
- втомне руйнування, яке супроводжується утворенням і розвитком тріщин в результаті багаторазово повторюваних силових

¹⁰⁹ Dadashov I., Loboichenko V., Kireev A. Analysis of the ecological characteristics of environment friendly fire fighting chemicals used in extinguishing oil products. *Pollution Research*. 2018. Vol. 37 (1). P. 63–77 [146]; Абрамов Ю. О., Басманов О. Є., Олійник В. В. Пат. UA 152609 U, Україна, МПК B65D 88/34 (2006.01). Резервуар для нафтопродуктів/патентовласник: Національний університет цивільного захисту України. № u202202966; заяв. 16.08.2022; опубл. 23.03.2023, бюл. № 12 [147]; Абрамов Ю. О., Байтала М. Р. Математична модель пожежі нафтопродукту на залізничному транспорті. *Пожежна безпека: теорія і практика*. 2009. № 4. С. 10–13 [148].

¹¹⁰ Там само [146]; [147]; [148].

впливів від вібрації та інших змінних навантажень, що прикладаються безпосередньо до резервуару¹¹¹.

Тому актуальним і необхідним є вдосконалення методів дослідження властивостей матеріалів резервуарів та оцінки впливу зовнішніх факторів на ці екологічно небезпечні об'єкти¹¹².

¹¹¹ Абрамов Ю. О., Басманов О. Є., Олійник В. В. Пат. UA 152609 U, Україна, МПК B65D 88/34 (2006.01). Резервуар для нафтопродуктів/патентовласник: Національний університет цивільного захисту України. № u202202966; заяв. 16.08.2022; опубл. 23.03.2023, бюл. № 12 [147]; Абрамов Ю. О., Байтала М. Р. Математична модель пожежі нафтопродукту на залізничному транспорті. *Пожезна безпека: теорія і практика*. 2009. № 4. С. 10–13 [148]; Дубицький А. Ю., Чепкий Л. П., Семенов І. О. Характеристика аварій на хімічно-небезпечних об'єктах. *Современные проблемы токсикологии*. 1999. №2. С. 14–17 [149]; Липовий В. О., Удяньський М. М. Техногенні ризики забруднення довкілля під час експлуатування та ремонтних робіт резервуарів з нафтопродуктами. Харків : НУГЗУ. 2017. 107 с. [150].

¹¹² Salzano E., Iervolino I., Fabbrocino G. Seismic risk of atmospheric storage tanks in the framework of quantitative risk analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2003. Vol. 16, Is. 5. P. 403-409. URL: [https://doi.org/10.1016/S0950-4230\(03\)00052-4](https://doi.org/10.1016/S0950-4230(03)00052-4) [17]; Dai Z., Qiao H., Hao X., Wang Y., Lei H., Cui Z. Influence of Heterogeneous Foundation on the Safety of Inverted Cone Bottom Oil Storage Tanks under Earthquakes. *Buildings*. 2023. Vol. 13. 1720. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings13071720> [18]; Sierikova O., Strelnikova E., Gnitko V., Degtyarev K. Boundary Calculation Models for Elastic Properties Clarification of Three-dimensional Nanocomposites Based on the Combination of Finite and Boundary Element Methods. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2021. P. 351-356, DOI: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570086 [23].

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ВПЛИВУ СЕЙСМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА СТІЙКІСТЬ РЕЗЕРВУАРІВ

2.1. Математичне моделювання параметрів землетрусів

Проведемо математичне моделювання параметрів землетрусів від 1 до 9 балів за шкалою Ріхтера та із відстанню до епіцентру від 10 до 1000 м для визначення розповсюдження впливу дії сейсмічних впливів на резервуари зберігання рідких вуглеводнів¹¹³. Основний вражаючий фактор землетрусу – поверхневі та об’ємні сейсмічні хвилі.

Проведемо моделювання пікових амплітуд сейсмічного прискорення. Розглянуто дію землетрусу від 1 до 9 балів та відстань до епіцентру від 10 до 1000 м (Рисунок 2.1).

Амплітуди сейсмічного прискорення збільшуються при наближенні до епіцентру землетрусу починаючи з відстані 250 м від епіцентру та є максимальними в епіцентрі.

Домінантні частоти збудження при землетрусі від 1 до 9 балів при відстані до епіцентру від 10 до 1000 м зображено на Рисунок 2.2.

¹¹³ Medvedovskaya T., Strelnikova E., Medvedyeva K. Free hydroelastic vibrations of hydroturbine head covers. *Int. J. Eng. and Advanced Research Technology*. 2015. Vol. 1. № 1. P. 45–50 [151]; Серікова О. М., Стрельнікова О. О., Крютченко Д. В. Оцінка сили сейсмічних навантажень на резервуари для збереження отруйних та легкозаймистих рідин. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*. 2021. Вип. 51. С. 70-80. URL: <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2021-51-08> [152]; Gnitko V., Degtyariov K., Karaiev A., Strelnikova E., Multi-domain boundary element method for axisymmetric problems in potential theory and linear isotropic elasticity, *WIT Transactions on Engineering Sciences*. WIT Press. 2019. P. 13–25. URL: <https://doi.org/10.2495/BE410021> [153]; Strelnikova E., Kriutchenko D., Gnitko V., Degtyarev K. Boundary element method in nonlinear sloshing analysis for shells of revolution under longitudinal excitations. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2020. Vol. 111. P. 78-87. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2019.10.008> [154].

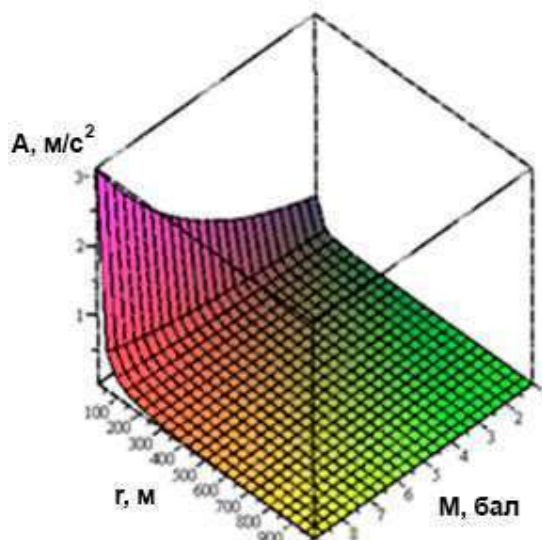


Рисунок 2.1 – Пікові амплітуди сейсмічного прискорення при землетрусі від 1 до 9 балів при відстані до епіцентру від 10 до 1000 м, де A – пікова амплітуда сейсмічного прискорення, м/с^2 ; r – епіцентрально відстань, м; M – магнітуда, бал

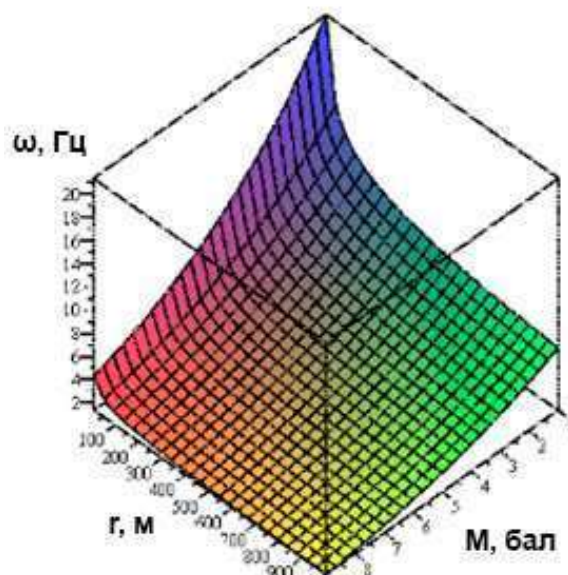


Рисунок 2.2 – Домінантні частоти збудження при землетрусі від 1 до 9 балів при відстані до епіцентру від 10 до 1000 м, де ω – доміантна частота збудження, Гц; r – епіцентрально відстань, м; M – магнітуда, бал.

Домінантні частоти збудження при землетрусі в 1 бал в епіцентрі є максимальними.

Середня тривалість впливу під час землетрусу від 1 до 9 балів при відстані до епіцентру від 10 до 1000 м представлена на рисунку 2.3.

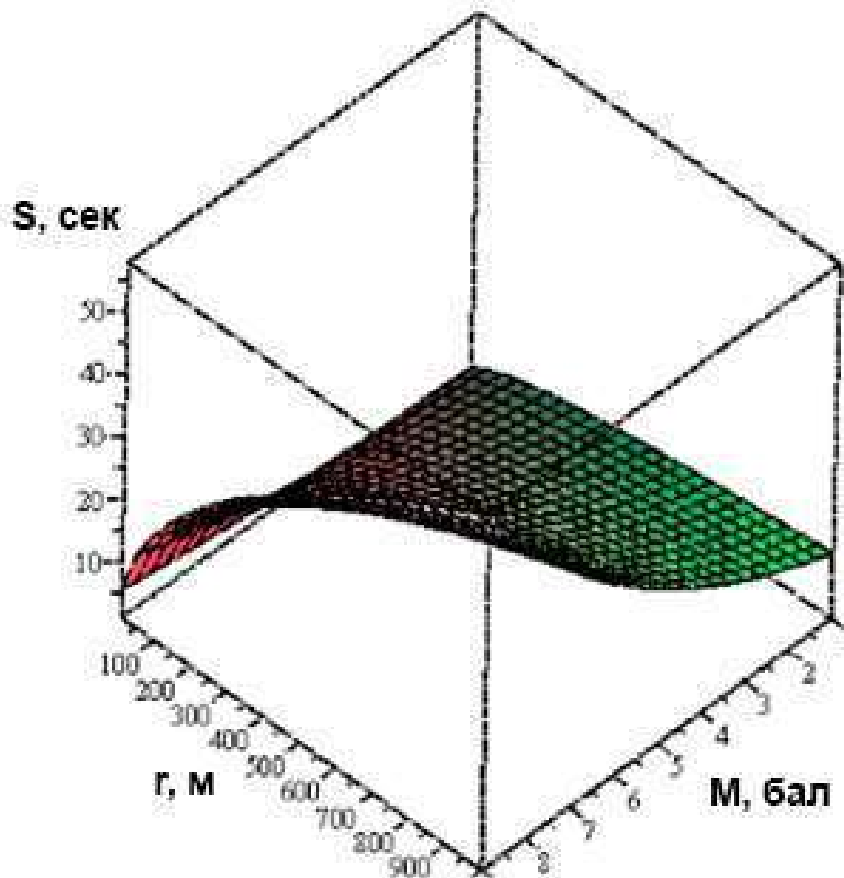


Рисунок 2.3 – Середня тривалість впливу під час землетрусу від 1 до 9 балів при відстані до епіцентру від 10 до 1000 м, де S – середня тривалість впливу, сек; r – епіцентральна відстань, м; M – магнітуда, бал

Тривалість впливу дії землетрусу збільшується при підвищенні бальності землетрусу та збільшенні відстані від епіцентру.

Таким чином, вплив дії землетрусу починається в епіцентрі, але набирає прискорення на відстані 250 м від епіцентру, далі набирає сили із тривалістю впливу та має найбільш руйнівний характер на відстані 1000 м від епіцентру.

У даній роботі розглядається задача про коливання рідини в довільній оболонці обертання. Позначимо змочену поверхню оболонки через S_1 , а вільну поверхню – S_0 (Рисунок 2.4) Як модель нафтоховища розглянемо циліндричну оболонку з плоским дном, частково заповнену рідиною.

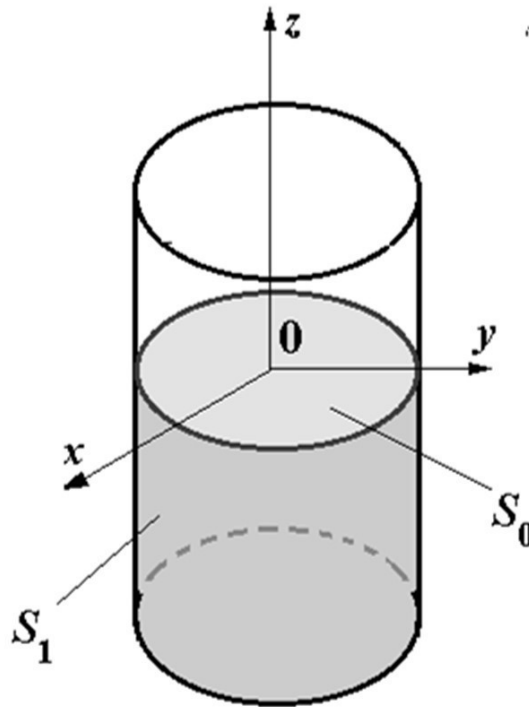


Рисунок 2.4. – Циліндричний резервуар

Вважаємо, що декартова система координат $Oxyz$ пов'язана з оболонкою, вільна поверхня рідини S_0 збігається з площиною xOy в стані спокою. Приймаємо, що рідина є ідеальною, нестисливою, рух рідини розпочинається зі стану спокою та є безвихровим. В таких умовах існує потенціал швидкостей рідини, що задовольняє рівнянню Лапласа:

$$V_x = \frac{\partial \Phi}{\partial x}; V_y = \frac{\partial \Phi}{\partial y}; V_z = \frac{\partial \Phi}{\partial z},$$

Величину тиску p на стінки оболонки визначаємо з лінеаризованого інтеграла Коші-Лагранжа за формулою:

$$p = -\rho_l \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + gz \right) + p_0 + a_s(t)x,$$

в якій Φ – потенціал швидкостей, g – прискорення вільного падіння, z – координата точки рідини, яка відлічується в вертикальному

напрямку, ρ_l – щільність рідини, p_0 – атмосферний тиск, $a_s(t)x$ – функція, що характеризує зовнішній вплив (горизонтальний сейсм або імпульс).

На вільній поверхні рідини повинні бути виконані наступні кінематична і динамічна умови:

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial n} \right|_{S_0} = \frac{\partial \zeta}{\partial t}; \quad p - p_0|_{S_0} = 0,$$

де функція ζ описує форму і положення вільної поверхні.

Таким чином, для потенціалу швидкостей маємо наступну крайову задачу

$$\begin{aligned} \nabla^2 \Phi &= 0; \quad \left. \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{n}} \right|_{S_1} = 0; \quad \left. \frac{\partial \Phi}{\partial n} \right|_{S_0} = \frac{\partial \zeta}{\partial t}; \quad p - p_0|_{S_0} = 0; \\ \left. \frac{\partial \Phi}{\partial t} + g\zeta + a_s(t)x \right|_{S_0} &= 0. \end{aligned}$$

Визначивши потенціал швидкостей Φ і функцію ζ , встановимо висоту підйому вільної поверхні і визначимо тиск рідини на стінки оболонки.

Представимо потенціал Φ у вигляді

$$\Phi = \sum_{k=1}^M \dot{d}_k \varphi_k. \quad (2.1)$$

Для функцій φ_k розглянемо наступні крайові задачі:

$$\nabla^2 \varphi_k = 0, \quad \left. \frac{\partial \varphi_k}{\partial \mathbf{n}} \right|_{S_1} = 0, \quad (2.2)$$

$$\left. \frac{\partial \varphi_k}{\partial \mathbf{n}} \right|_{S_0} = \frac{\partial \zeta}{\partial t}; \quad \frac{\partial \varphi_k}{\partial t} + g\zeta = 0. \quad (2.3)$$

Продифференціюємо друге співвідношення в (2.3) по t і підставимо в отриману рівність $\frac{\partial \zeta}{\partial t}$ з першого співвідношення. Далі

представимо функції φ_k у вигляді $\varphi_k(t, x, y, z) = e^{i\chi_k t} \varphi_k(x, y, z)$. Приходимо до проблеми власних значень, при цьому на вільній поверхні буде виконано рівність

$$\frac{\partial \varphi_k}{\partial n} = \frac{\chi_k^2}{g} \varphi_k. \quad (2.4)$$

Для рівняння вільної поверхні отримаємо вираз:

$$\zeta = \sum_{k=1}^M d_k \frac{\partial \varphi_k}{\partial n}. \quad (2.5)$$

В циліндричній системі координат маємо вирази для шуканих функцій

$$\varphi_k(r, z, \theta) = \varphi_k(r, z) \cos \alpha \theta \quad (2.6)$$

Тут α – номер гармоніки. Таким чином, окремо розглядаються частоти і форми вільних коливань для різних α .

Представимо φ у вигляді суми потенціалів простого і подвійного шару¹¹⁴

$$2\pi\varphi(P_0) = \iint_S \frac{\partial \varphi}{\partial n} \frac{1}{|P - P_0|} dS - \iint_S \varphi \frac{\partial}{\partial n} \frac{1}{|P - P_0|} dS. \quad (2.7)$$

Тут $S = S_1 \cup S_0$; точки P та P_0 належать поверхні S .

Величина $|P - P_0|$ - декартова відстань між точками P та P_0 .

Задовольнивши граничним умовам (2.2), (2.3), приходимо до системи інтегральних рівнянь у вигляді [207]:

$$\begin{cases} 2\pi\varphi_1 + \iint_{S_1} \varphi_1 \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) dS_1 - \frac{\kappa^2}{g} \iint_{S_0} \varphi_0 \frac{1}{r} dS_0 + \iint_{S_0} \varphi_0 \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \right) dS_0 = 0, \\ - \iint_{S_1} \varphi_1 \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) dS_1 - 2\pi\varphi_0 + \frac{\kappa^2}{g} \iint_{S_0} \varphi_0 \frac{1}{r} dS_0 = 0. \end{cases} \quad (2.8)$$

Тут для зручності позначаємо значення потенціалу на вільній поверхні як φ_0 та φ_1 на стінках оболонки.

Рішення системи (2.8) шукаємо у вигляді (2.6).

Для вирішення цієї системи сингулярних інтегральних рівнянь застосуємо метод граничних елементів¹¹⁵.

¹¹⁴ Там само [151]; [152]; [153]; [154].

¹¹⁵ Дубицький А. Ю., Чепкий Л. П., Семенов І. О. Характеристика аварій на хімічно-небезпечних об'єктах. *Современные проблемы токсикологии*. 1999. №2. С. 14–17 [149]; Липовий В. О., Удяньський М. М. Техногенні ризики забруднення довкілля під час експлуатування та ремонтних робіт резервуарів з нафтопродуктами. Харків : НУГЗУ, 2017. 107 с. [150].

Визначивши базисні функції φ_k , підставимо їх у вирази для потенціалу швидкостей (2.1) і форми вільної поверхні (2.5). Отримані ряди підставляємо в крайову умову на вільній поверхні:

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial t} + g\zeta + a_s(t)x \right|_{S_0} = 0.$$

Оскільки в циліндричній системі координат $x = r \cos \theta$, то нас буде цікавити тільки перша гармоніка, тобто у формулі (4.6) вважаємо $\alpha=1$. Приходимо до наступного співвідношення, виконаному на поверхні S_0

$$\sum_{k=1}^M \ddot{d}_k \varphi_k + g \sum_{k=1}^M d_k \frac{\partial \varphi_k}{\partial n} + a_s(t)r = 0.$$

Але на поверхні S_0 виконано співвідношення (4), тоді наведене вище рівність набуде вигляду:

$$\sum_{k=1}^M \ddot{d}_k \varphi_k + \sum_{k=1}^M \chi_k^2 d_k \varphi_k + a_s(t)r = 0. \quad (2.9)$$

Помноживши рівність (4.9) скалярно на φ_l ($l = \overline{1, M}$) і скориставшись ортогональністю власних форм, отримаємо систему звичайних диференціальних рівнянь другого порядку

$$\ddot{d}_k + \chi_k^2 d_k + a_s(t)F_k = 0; \quad F_k = \frac{(r, \varphi_k)}{(\varphi_k, \varphi_k)}; \quad k = \overline{1, M}. \quad (2.10)$$

Вважаємо, що до початку дії горизонтальної навантаження резервуар знаходився в стані спокою. Тоді (2.10) вирішуємо при нульових початкових умовах. Для вирішення системи (2.10) в роботі застосовано операційний метод¹¹⁶.

2.2. Математичне моделювання плескань рідини в резервуарах, викликаних сейсмічними навантаженнями методами нечіткої логіки

Термін нечіткість стосується речей, які є незрозумілими або розпливчастими. У реальному світі багато разів ми стикаємося з

¹¹⁶ Medvedovskaya T., Strelnikova E., Medvedyeva K. Free hydroelastic vibrations of hydroturbine head covers. *Int. J. Eng. and Advanced Research Technology*. 2015. Vol. 1. № 1. P. 45–50 [151].

ситуацією, коли ми не можемо визначити, чи є стан істинним чи хибним, їх нечітка логіка забезпечує дуже цінну гнучкість для міркувань. Таким чином ми можемо розглянути неточності та невизначеності будь-якої ситуації.

Нечітка логіка – це форма багатозначної логіки, у якій істинними значеннями змінних можуть бути будь-які дійсні числа від 0 до 1, замість традиційних значень істини чи хибності. Він використовується для роботи з неточною або невизначеною інформацією та є математичним методом представлення невизначеності та невизначеності під час прийняття рішень.

Нечітка логіка базується на ідеї, що в багатьох випадках концепція істинності чи хибності є надто обмеженою, і що між ними є багато відтінків сірого. Він допускає часткові істини, коли твердження може бути частково істинним або хибним, а не повністю істинним або хибним.

Нечітка логіка використовується в широкому діапазоні програм, таких як системи керування, обробка зображень, обробка природної мови, медична діагностика та штучний інтелект.

Фундаментальною концепцією нечіткої логіки є функція належності, яка визначає ступінь належності вхідного значення до певного набору або категорії. Функція приналежності – це відображення вхідного значення на ступінь приналежності між 0 і 1, де 0 означає відсутність членства, а 1 – повне членство.

Нечітка логіка реалізована за допомогою нечітких правил, які є операторами «якщо-тоді», які виражають зв'язок між вхідними змінними та вихідними змінними нечітким способом. Результатом системи нечіткої логіки є нечіткий набір, який є набором ступенів належності для кожного можливого вихідного значення.

Таким чином, нечітка логіка – це математичний метод представлення невизначеності під час прийняття рішень, він допускає часткові істини та використовується в широкому діапазоні застосувань. Він заснований на концепції функції належності, а реалізація здійснюється за допомогою нечітких правил.

У значенні істинності булевої системи 1,0 представляє абсолютне значення істинності, а 0,0 представляє абсолютне значення хибності. Але в нечіткій системі немає логіки для абсолютної істини та абсолютної хибної цінності. Але в нечіткій логіці також є проміжне значення, яке є частково істинним і частково хибним (Рисунок 2.5).

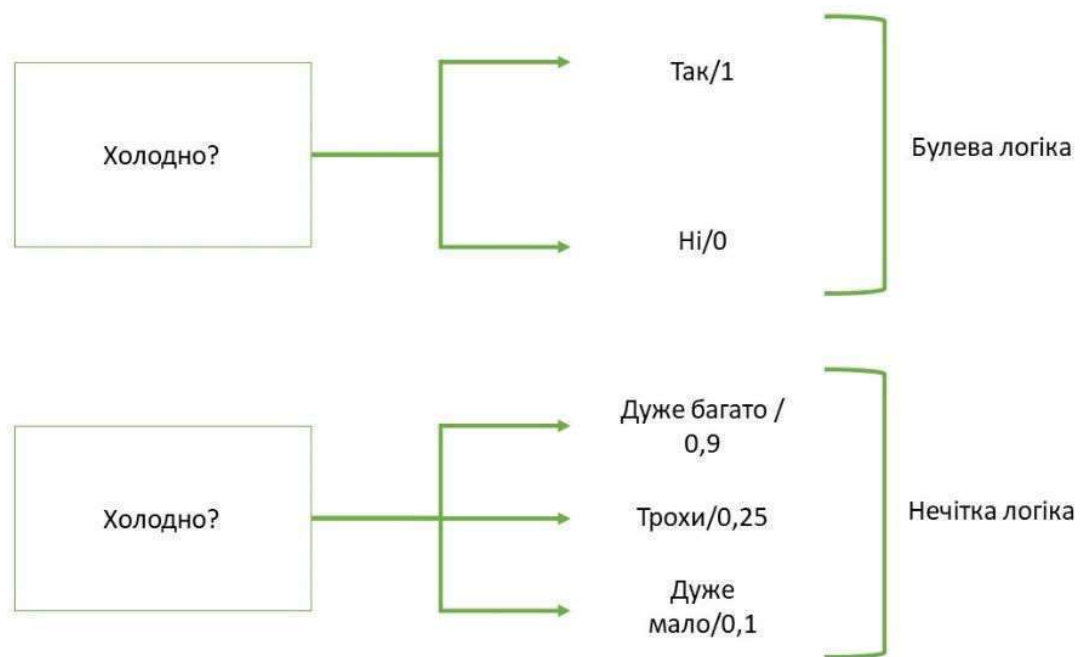


Рисунок 2.5. Представлення невизначеності під час прийняття рішень

Його будова складається з чотирьох частин (Рисунок 2.6):

1) База правил: містить набір правил і умов «якщо-тоді», наданих експертами для керування системою прийняття рішень на основі лінгвістичної інформації. Останні розробки в теорії нечітких процесів пропонують кілька ефективних методів проектування та налаштування нечітких контролерів. Більшість цих розробок зменшує кількість нечітких правил.

2) Фазифікація: використовується для перетворення вхідних даних, тобто чітких чисел, у нечіткі набори. Чіткі вхідні дані – це в основному точні вхідні дані, які вимірюються датчиками та передаються в систему керування для обробки, наприклад температура, тиск, оберти на хвилину тощо.

3) Механізм висновку: він визначає ступінь відповідності поточного нечіткого введення щодо кожного правила та вирішує, які правила мають бути запущені відповідно до поля введення. Далі запущені правила об'єднуються для формування керуючих дій.

4) Дефазифікація: використовується для перетворення нечітких наборів, отриманих механізмом логічного висновку, у чітке значення. Існує кілька доступних методів дефазифікації, і найкраще

підходить із них із конкретною експертною системою, щоб зменшити помилку.



Рисунок 2.6 – Структура нечіткої логіки

Визначення: графік, який визначає, як кожна точка у вхідному просторі відображається на значення приналежності між 0 і 1. Вхідний простір часто називають всесвітом дискурсу або універсальним набором (u), який містить усі можливі елементи, що викликають занепокоєння в кожного окремого додатка.

В основному існує три типи фазифікаторів:

Однотонний фазифікатор;

Фазифікатор Гауса;

Трапецієподібний або трикутний фузифікатор.

Fuzzy Control – це техніка для втілення людського мислення в систему управління.

Він може бути розроблений не для того, щоб дати точне обґрунтування, але він призначений для того, щоб дати прийнятне обґрунтування.

Він може імітувати людське дедуктивне мислення, тобто процес, за допомогою якого люди роблять висновки з того, що вони знають.

Будь-яку невизначеність можна легко вирішити за допомогою нечіткої логіки.

Переваги системи нечіткої логіки:

- Ця система може працювати з будь-якими типами вхідних даних, будь то неточна, спотворена або шумна вхідна інформація.
- Побудова систем нечіткої логіки проста і зрозуміла.
- Нечітка логіка приходить з математичними концепціями теорії множин, і аргументація цього досить проста.
- Він забезпечує дуже ефективне вирішення складних проблем у всіх сферах життя, оскільки нагадує людські міркування та прийняття рішень.
- Алгоритми можна описати з невеликою кількістю даних, тому потрібно мало пам'яті.

Недоліки систем нечіткої логіки:

- Багато дослідників пропонували різні способи вирішення даної проблеми за допомогою нечіткої логіки, яка призводить до неоднозначності. Немає системного підходу до вирішення даної проблеми за допомогою нечіткої логіки.
- Довести його характеристики в більшості випадків важко або неможливо, тому що кожного разу ми не отримуємо математичного опису нашого підходу.
- Оскільки нечітка логіка працює як з точними, так і з неточними даними, точність у більшості випадків є під загрозою.

Застосування:

- Метод нечіткої логіки використовуються в аерокосмічній галузі для контролю висоти космічних апаратів і супутників.
- Його використовували в автомобільній системі для контролю швидкості, управління рухом.
- Він використовується для систем підтримки прийняття рішень і особистої оцінки в бізнесі великих компаній.
- Застосовується в хімічній промисловості для контролю рН, сушіння, процесу хімічної дистиляції.
- Нечітка логіка використовується в обробці природної мови та різних інтенсивних програмах штучного інтелекту.
- Нечітка логіка широко використовується в сучасних системах керування, таких як експертні системи.
- Нечітка логіка використовується з нейронними мережами, оскільки вона імітує те, як людина приймає рішення, але набагато швидше. Це здійснюється шляхом агрегування даних і зміни їх на більш значущі дані шляхом формування часткових істин у вигляді нечітких наборів.

В монографії метод нечіткої логіки застосовується з метою аналізу коливань рідини в жорстких резервуарах при сейсмічних навантаженнях.

В даному дослідженні розглядаються резервуари для зберігання рідини під дією сейсмічних навантажень із застосуванням аналізу нечіткої вібрації. Вирішальним питанням тут є опис порушення нестримної вільної поверхні рідини в контейнері під час плескання, спричиненого землетрусом.

Новизна запропонованого методу полягає у використанні нечітких концепцій для аналізу невизначеностей параметрів землетрусів.

Розглянуто коливання рідини в жорстких резервуарах, що містять рідини, при горизонтальних і вертикальних збудженнях. Резервуари для зберігання описуються як оболонки обертання. Рідина вважається ідеальною і нестисливою, а її рух, викликаний прикладеними навантаженнями, є безобертовим. Спочатку були вивчені вільні коливання, а потім отримані власні моди були використані як базові функції для аналізу вимушених коливань.

Моделювання розплескування рідини в твердих резервуарах детермінованими методами

По-перше, розроблений детермінований метод, який базується на методах граничних елементів і багатомодальному підході для лінійного та нелінійного аналізу розплескування в резервуарах, частково заповнених рідинами, які піддаються горизонтальним і вертикальним збудженням одночасно¹¹⁷.

Слід зазначити, що методи граничних елементів (МГЕ) дозволяють описувати ефекти плескання в контейнерах різної конфігурації. Резервуар, що розглядається, та його ескіз представлені на рисунку 2.7. Резервуар прийнято жорстким, тому ефектами пружності стінок резервуару нехтують.

Задача про коливання рідини в твердих оболонках формулюється як у лінійній, так і в слабко нелінійній¹¹⁸ постановках.

¹¹⁷ Gnitko V., Degtyariov K., Karaiev A., Strelnikova E., Multi-domain boundary element method for axisymmetric problems in potential theory and linear isotropic elasticity, *WIT Transactions on Engineering Sciences*. WIT Press. 2019. P. 13–25. URL: <https://doi.org/10.2495/BE410021> [153].

¹¹⁸ Gnitko V., Degtyariov K., Karaiev A., Strelnikova E., Multi-domain boundary element method for axisymmetric problems in potential theory and linear

Отже, необхідно задіяти залежний від часу об'єм рідини $Q(t)$, а також поверхні $S_1 = S_1(t)$, $S_0 = S_0(t)$, які відповідали відповідно жорстким змоченим стінкам оболонки та вільній поверхні рідини (Рисунок 2.7).

У наведених вище припущеннях про рідину та її рух існує потенціал швидкості Φ , який задовольняє наступну крайову задачу для рівняння Лапласа в залежній від часу області рідини $Q(t)$ ¹¹⁹:

$$\nabla^2 \Phi = 0, \left. \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{n}} \right|_{S_1(t)} = 0, p - p_0 = 0, \left. \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{n}} = \frac{\partial \zeta / \partial t}{\sqrt{1 + |\nabla \zeta|^2}} \right|_{S_0(t)}, \quad (2.11)$$

де $\mathbf{n}$ – це зовнішній одиничний вектор нормалі до розглянутої поверхні, $\zeta = \zeta(x, y, t)$ є невідомою функцією, що описує рівень вільної поверхні та її розташування. Умова непроникнення виконана на твердій поверхні $S_1(t)$, тоді як динамічні та кінематичні умови були застосовані до вільної поверхні $S_0(t)$.

Для отримання тиску було використано рівняння Бернуллі на вільній поверхні, що залежить від часу $S_0(t)$

$$p - p_0 = -\rho_l \left[\frac{\partial \Phi}{\partial t} + a_x(t)x + (g + a_z(t))\zeta + \frac{1}{2}(\nabla \Phi, \nabla \Phi) \right]. \quad (2.12)$$

Тут g це прискорення сили тяжіння, ρ_l – густина рідини, $a_x(t), a_z(t)$ є рушійними прискореннями в поперечному та поздовжньому напрямках. Умову розв'язності крайової задачі (2.11), (2.12) задано як [E. Strelnikova, D. Kriutchenko]

isotropic elasticity, *WIT Transactions on Engineering Sciences*. WIT Press. 2019. P. 13–25. URL: <https://doi.org/10.2495/BE410021> [153]; Strelnikova E., Kriutchenko D., Gnitko V., Degtyarev K. Boundary element method in nonlinear sloshing analysis for shells of revolution under longitudinal excitations. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2020. Vol. 111. P. 78-87. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2019.10.008> [154]; Degtyariov K., Gnitko V., Kononenko Y., Kriutchenko D., Sierikova O., Strelnikova E. Fuzzy Methods for Modelling Earthquake Induced Sloshing in Rigid Reservoirs. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2022. P. 297-302. URL: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916466> [155]; Gnitko V., Degtyariov K., Naumenko V., Strelnikova E. BEM and FEM analysis of the fluidstructure interaction in tanks with baffles, *Int. Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. 2017. Vol. 5 (3). P. 317–328. URL: <https://doi.org/10.2495/CMEM-V5-N3-317-328> [156].

¹¹⁹ Зоценко М. Л., Винников Ю. Л., Харченко М. О., Ларцева І. І. Забезпечення надійної експлуатації нафтових резервуарів у складних геотехнічних умовах при сейсмічних впливах. *Проблеми та перспективи нафтогазової промисловості*. 2018. Вип. 2. С. 65-90. URL: <https://doi.org/10.32822/naftogazscience.2018.02.065> [20].

$$\iiint_{Q(t)} dQ(t) = 0. \quad (2.13)$$

Квадратичні члени в (2.11)-(2.12) були знехтовані, якщо проблема розглядається в лінійному формулюванні та поверхнях S_0 та S_1 потім розглядалися як незалежні від часу.

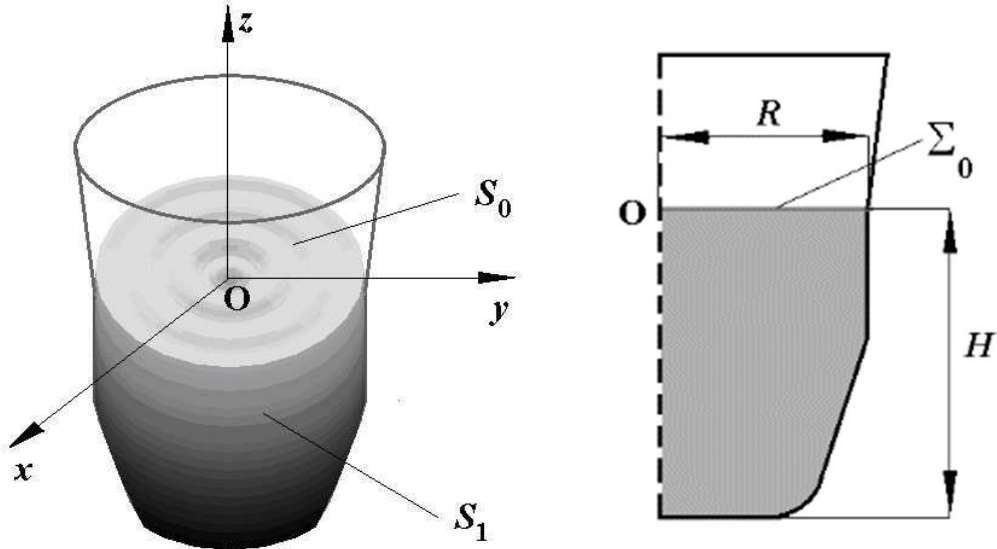


Рисунок 2.7 – Оболонка обертання, заповнена рідиною, та її ескіз

Невідома висота вільної поверхні ζ і потенціал швидкості Φ виражаються в циліндричних координатах як наступний ряд¹²⁰:

¹²⁰ Gnitko V., Degtyariov K., Karaiev A., Strelnikova E., Multi-domain boundary element method for axisymmetric problems in potential theory and linear isotropic elasticity, *WIT Transactions on Engineering Sciences*. WIT Press. 2019. P. 13–25. URL: <https://doi.org/10.2495/BE410021> [153]; Strelnikova E., Kriutchenko D., Gnitko V., Degtyarev K. Boundary element method in nonlinear sloshing analysis for shells of revolution under longitudinal excitations. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2020. Vol. 111. P. 78–87. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2019.10.008> [154]; Degtyariov K., Gnitko V., Kononenko Y., Kriutchenko D., Sierikova O., Strelnikova E. Fuzzy Methods for Modelling Earthquake Induced Sloshing in Rigid Reservoirs. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2022. P. 297–302. URL: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.99164664> [155]; Gnitko V., Degtyariov K., Naumenko V., Strelnikova E. BEM and FEM analysis of the fluidstructure interaction in tanks with baffles, *Int. Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. 2017. Vol. 5 (3). P. 317–328. URL: <https://doi.org/10.2495/CMEM-V5-N3-317-328> [165]; Zheng Jh., Xue M. A., Dou P., et al. A review on liquid sloshing hydrodynamics. *J Hydrodyn*. 2021. Vol. 33. P. 1089–1104. URL: <https://doi.org/10.1007/s42241-022-0111-7> [157].

$$z = \zeta(r, \theta, t) = \sum_{k=1}^{\infty} c_k(t) \zeta_k(r, \theta), \quad (2.14)$$

$$\Phi(r, \theta, z, t) = \sum_{k=1}^{\infty} d_k(t) \varphi_k(r, \theta, z). \quad (2.15)$$

Основні функції $\zeta_k(r, \theta)$ та $\varphi_k(r, \theta, z)$ в (2.14), (2.15) є розв'язками лінійної спектральної крайової задачі¹²¹ з нерухомими поверхнями $S_0(0)$, $S_1(t)$, тому справедливе наступне співвідношення

$$\zeta_k(r, \theta) = \left. \frac{\partial \varphi_k(r, \theta, z)}{\partial z} \right|_{S_0} = \frac{\chi_k^2}{g} \varphi_k(r, \theta, 0). \quad (2.16)$$

Слід зазначити, що залежності від θ у функціях $\zeta_k(r, \theta)$ та $\varphi_k(r, \theta, z)$ були виражені як добутки відповідних функцій $\cos \alpha \theta$, $\sin \alpha \theta$, де α це хвильове число.

Відповідно до¹²² у слабко нелінійній формулюванні слід розглядати лише такі режими: $\Phi_{11}(r, z) \cos \theta$, $\Phi_{11}(r, z) \sin \theta$, $\Phi_{01}(r, z)$, $\Phi_{21}(r, z) \cos 2\theta$, та $\Phi_{21}(r, z) \sin 2\theta$. Введено наступні позначення:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= \Phi_{11}(r, z) \cos \theta, & \Phi_2 &= \Phi_{11}(r, z) \sin \theta, \\ \Phi_3 &= \Phi_{01}(r, z), & \Phi_4 &= \Phi_{21}(r, z) \cos 2\theta, \\ \Phi_5 &= \Phi_{21}(r, z) \sin 2\theta, & \zeta_1 &= \zeta_{11}(r, 0) \cos \theta, \\ & & \zeta_2 &= \zeta_{11}(r, 0) \sin \theta, & \zeta_3 &= \zeta_{01}(r, 0), \\ & & \zeta_4 &= \zeta_{21}(r, 0) \cos 2\theta, & \zeta_5 &= \zeta_{21}(r, 0) \sin 2\theta. \end{aligned}$$

Отже, наближення для функцій ζ та Φ можна отримати як

$$\Phi(r, z, \theta, t) = \sum_{k=1}^5 R_k(t) \Phi_k(r, \theta, z), \quad (2.17)$$

$$\zeta(r, \theta, t) = \sum_{k=1}^5 \beta_k(t) \zeta_k(r, \theta, 0). \quad (2.18)$$

Залежні від часу коефіцієнти $\beta_k(t)$, $R_k(t)$ в (2.17), (2.18) розглядалися як узагальнені координати, тоді як функції $\zeta_{\alpha k}(r, z)$, $\Phi_{\alpha k}(r, z)$ є розв'язками лінійної спектральної крайової задачі¹²³

¹²¹ Strelnikova E., Choudhary N., Kriutchenko D., Gnitko V., Tonkonozhenko A. Liquid vibrations in circular cylindrical tanks with and without baffles under horizontal and vertical excitations. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2020. Vol. 120. P. 13-27. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2020.07.02m> [29]; Choudhary N., Kumar N., Strelnikova E., Gnitko V., Kriutchenko D., Degtyariv K. Liquid vibrations in cylindrical tanks with flexible membranes. *Journal of King Saud University Science*. 2021. Vol. 33 (8). 101589. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101589> [30].

¹²² Raynovskyy I. A., Timokha A. N. Sloshing in Upright Circular Containers: Theory, Analytical Solutions, and Applications. CRC Press/Taylor & Francis Group. 2020. 170 p. [158].

¹²³ Strelnikova E., Choudhary N., Kriutchenko D., Gnitko V., Tonkonozhenko

$$\nabla^2 \Phi = 0, \left. \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{n}} \right|_{S_1} = 0, \left. \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{n}} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \right|_{S_0}, \left. \frac{\partial \Phi}{\partial t} + g\zeta \right|_{S_0} = 0. \quad (2.19)$$

Після отримання розв'язків (2.19) і задоволення динамічної граничної умови в лінійній постановці, а саме

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + a_x(t)x + (g + a_z(t))\zeta = 0, \quad (2.20)$$

можна зробити висновок, що проблема вимушених коливань рідини в твердій оболонці перейшла до наступної системи звичайних диференціальних рівнянь другого порядку

$$\begin{aligned} \ddot{d}_{0k} + \chi_{0k}^2 \left(1 + \frac{a_z(t)}{g} \right) d_{0k} &= 0, \\ \ddot{d}_{1k} + \chi_{1k}^2 \left(1 + \frac{a_z(t)}{g} \right) d_{1k} + a_x(t)F_{1k} &= 0, \\ F_{1k} &= \frac{(r, \varphi_{1k})}{(\varphi_{1k}, \varphi_{1k})}, k = 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (2.21)$$

Тут було враховано, що $\dot{d}_k(t) = c_k(t)$ через кінематичну граничну умову в (2.19).

Систему (11) розв'язано для таких початкових даних, а саме

$$d_0(0) = 0, \dot{d}_0(0) = d_{10}, d_1(0) = 0, \dot{d}_1(0) = 0. \quad (2.22)$$

Для вирішення крайової задачі (1) у слабко нелінійній постановці використовується мультимодальний метод¹²⁴.

Використовуючи варіаційний принцип Лагранжа для тиску, нелінійну крайову задачу (2.11) було зведено до виконання необхідних екстремальних умов для функціоналу

$$W = \int_{t_1}^{t_2} L dt. \quad (2.23)$$

Тут Лагранж L був визначений як наступний інтеграл по об'єму рідини $Q(t)$

A. Liquid vibrations in circular cylindrical tanks with and without baffles under horizontal and vertical excitations. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2020. Vol. 120. P. 13-27. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2020.07.02m> [29]; Choudhary N., Kumar N., Strelnikova E., Gnitko V., Kriutchenko D., Degtyariov K. Liquid vibrations in cylindrical tanks with flexible membranes. *Journal of King Saud University Science*. 2021. Vol. 33 (8). 101589. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101589> [30]; Zheng Jh., Xue M. A., Dou P., et al. A review on liquid sloshing hydrodynamics. *J Hydrodyn*. 2021. Vol. 33. P. 1089–1104. URL: <https://doi.org/10.1007/s42241-022-0111-7> [119].

¹²⁴ Raynovsky I. A., Timokha A. N. Sloshing in Upright Circular Containers: Theory, Analytical Solutions, and Applications. CRC Press/Taylor & Francis Group. 2020. 170 p. [158].

$$L = \iiint (p - p_0) dQ(t) = \\ = -\rho_l \iiint \left[\frac{\partial \Phi}{\partial t} + a_x(t)x + (g + a_z(t))\zeta + \frac{1}{2}(\nabla \Phi, \nabla \Phi) \right] dQ(t) \quad (2.24)$$

Розв'язки лінійної спектральної крайової задачі (2.19) використовуються надалі як базові функції для обчислення узагальнених координат у слабко нелінійній задачі (2.11). При цьому отримуємо варіацію функціонала (2.24) на $\beta_i(t)$ та $R_k(t)$ для даного g , $a_x(t)$ та $a_z(t)$. Тоді наступна система звичайних нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку для узагальнених координат $\beta_i(t)$, $i = \overline{1,5}$ виходить як в [E. Strelnikova, D. Kriutchenko, D. Zhou]:

$$\begin{aligned} \ddot{\beta}_1 + \chi_{11}^2 \left(1 + \frac{a_z(t)}{g} \right) \beta_1 + K_1(\beta_1 \dot{\beta}_1^2 + \dot{\beta}_1 \beta_1^2) + K_3(\ddot{\beta}_1 \beta_4 + \dot{\beta}_1 \dot{\beta}_4) + \\ + K_4 \beta_1 \ddot{\beta}_4 + K_5(\ddot{\beta}_1 \beta_3 + \dot{\beta}_1 \dot{\beta}_3) + K_6 \beta_1 \ddot{\beta}_3 + K_7 a_x(t) = 0, \\ \ddot{\beta}_3 + \chi_{01}^2 \left(1 + \frac{a_z(t)}{g} \right) \beta_3 + K_8 \dot{\beta}_1^2 + K_{10} \beta_1 \ddot{\beta}_1 = 0, \\ \ddot{\beta}_4 + \chi_{21}^2 \left(1 + \frac{a_z(t)}{g} \right) \beta_4 - K_7 \dot{\beta}_1^2 + K_9 \beta_1 \ddot{\beta}_1 = 0. \end{aligned} \quad (2.25)$$

Тут наявні значення коефіцієнтів K_m ($m = 1, 2, \dots, 9$) були надані D. Zhou, та χ_{m1} ($m = 0, 1, 2$) природні частоти плескання¹²⁵. Слід зазначити, що вихідними даними тут можна вважати наступне

¹²⁵ Gnitko V., Degtyariev K., Karaiev A., Strelnikova E., Multi-domain boundary element method for axisymmetric problems in potential theory and linear isotropic elasticity, *WIT Transactions on Engineering Sciences*. WIT Press. 2019. P. 13–25. URL: <https://doi.org/10.2495/BE410021> [218]; Strelnikova E., Kriutchenko D., Gnitko V., Degtyarev K. Boundary element method in nonlinear sloshing analysis for shells of revolution under longitudinal excitations. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2020. Vol. 111. P. 78–87. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2019.10.008> [22]; Degtyariev K., Gnitko V., Kononenko Y., Kriutchenko D., Sierikova O., Strelnikova E. Fuzzy Methods for Modelling Earthquake Induced Sloshing in Rigid Reservoirs. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2022. P. 297–302. URL: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916466> [54]; Gnitko V., Degtyariev K., Naumenko V., Strelnikova E. BEM and FEM analysis of the fluidstructure interaction in tanks with baffles, *Int. Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. 2017. Vol. 5 (3). P. 317–328. URL: <https://doi.org/10.2495/CMEM-V5-N3-317-328> [156]; Zheng Jh., Xue M. A., Dou P., et al. A review on liquid sloshing hydrodynamics. *J Hydrodyn*. 2021. Vol. 33. P. 1089–1104. URL: <https://doi.org/10.1007/s42241-022-01111-7> [157].

$$\beta_k(0) = 0, \quad \dot{\beta}_k(0) = 0, \quad k = \overline{1,5}. \quad (2.26)$$

Як і в¹²⁶, знайдено $\beta_2(t) = 0$ та $\beta_5(t) = 0$ за умов (2.26). Після розв'язування систем (2.21), (2.22) та (2.25), (2.26) було знайдено висоту вільної поверхні згідно (2.14) або (2.18).

Таким чином, отримано системи диференціальних рівнянь для визначення узагальнених координат висоти вільної поверхні при одночасній дії горизонтальних і вертикальних збуджень у лінійній і нелінійній постановках.

Функції $a_x(t)$ та $a_z(t)$ – горизонтальні та вертикальні прискорення, що характеризують реальні або синтезовані акселерограми землетрусів.

Чисельна схема реалізації

Тут було описано чисельний метод для вирішення лінійної спектральної граничної задачі (2.19). Відповідно до методу зважених нев'язок рівняння Лапласа для потенціалу Φ множимо на пробну функцію w та виконуємо інтегрування по об'єму рідини Q . Використовуючи першу формулу Гріна, ми маємо:

$$\iiint_Q w \nabla^2 \Phi dQ = - \iiint_Q (\nabla \Phi, \nabla w) dQ + \iint_S w (\nabla \Phi, \mathbf{n}) dS. \quad (2.27)$$

Тут $S = S_0 \cup S_1$. Знову використовуючи першу формулу Гріна, вона була отримана з (2.27)

$$\iiint_Q w \nabla^2 \Phi dQ = \iint_S \Phi (\nabla w, \mathbf{n}) d\Gamma_f - \iint_S w (\nabla \Phi, \mathbf{n}) d\Gamma_f. \quad (2.28)$$

Наступні сингулярні функції були використані як тестові

$$U(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0) = 1/|\mathbf{x} - \mathbf{x}_0|, \quad (2.29)$$

$$|\mathbf{x} - \mathbf{x}_0| = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}.$$

Слід зазначити, що $\nabla^2 U(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0) = \delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)$, де $\delta(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)$ є дельта-функцією Дірака. З (2.28) використовуючи $U(\mathbf{x}, \mathbf{x}_0^k)$ в якості пробних функцій отримано наступні сингулярні інтегральні рівняння ($k = 1, 2, \dots$):

$$2\pi\Phi(\mathbf{x}_0^k) = \iint_S \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{n}} \frac{1}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}_0^k|} dS - \iint_S \Phi \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} \frac{1}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}_0^k|} dS. \quad (2.30)$$

З урахуванням граничних умов на вільній поверхні в (2.19) отримано

$$2\pi\Phi(\mathbf{x}_0^k) + \iint_S \Phi \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} \frac{1}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}_0^k|} dS + \frac{1}{g} \iint_{S_0} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \frac{1}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}_0^k|} dS_0 = 0. \quad (2.31)$$

Припустимо, що $\Phi(r, \theta, z, t) = \exp(i\chi t) \varphi(r, \theta, z)$. Потім власні режими $\varphi_k(r, \theta, z)$ і частоти χ_k^2 вільних коливань рідини отримано для

¹²⁶ Там само [218]; [22]; [54]; [156]; [157].

кожного хвильового числа чисельним рішенням (2.31) застосування методів граничних елементів¹²⁷.

Передбачалося прискорення $a_x(t), a_z(t)$ є чіткими функціями. Перетворимо систему (2.21) до системи звичайних диференціальних рівнянь першого порядку наступним чином

$$\begin{aligned} \dot{d}_{0k}(t) &= q_{0k}(t), \dot{d}_{1k}(t) = q_{1k}(t), \\ q_{0k}(t) + \chi_{0k}^2 \left(1 + \frac{a_z(t)}{g}\right) d_{0k}(t) &= 0, \\ q_{1k}(t) + \chi_{1k}^2 \left(1 + \frac{a_z(t)}{g}\right) d_{1k}(t) + a_x(t) F_{1k} &= 0. \end{aligned} \quad (2.32)$$

Вихідні дані для розв'язку (2.32) прийнято у вигляді

$$d_0(t) = 0, q_0(t) = q_0, d_1(t) = 0, q_1(t) = 0. \quad (2.34)$$

Аналогічно було перетворено систему нелінійних рівнянь (2.25) до системи звичайних диференціальних рівнянь першого порядку. Потім:

$$\begin{aligned} \dot{\beta}_k &= \alpha_k, k = 1, 3, 4, \quad \alpha_1 + \chi_{11}^2 \left(1 + \frac{a_z(t)}{g}\right) \beta_1 + \\ &+ K_1 (\beta_1 \alpha_1^2 + \alpha_1 \beta_1^2) + K_3 (\alpha_1 \beta_4 + \alpha_1 \alpha_4) + \\ &+ K_4 \beta_1 \alpha_4 + K_5 (\alpha_1 \beta_3 + \alpha_1 \alpha_4) + K_6 \beta_1 \alpha_{13} + K_7 a_x(t) = 0, \\ \alpha_3 + \chi_{01}^2 \left(1 + \frac{a_z(t)}{g}\right) \beta_3 + K_8 \alpha_1^2 + K_{10} \beta_1 \alpha_1 &= 0, \\ \alpha_4 + \chi_{21}^2 \left(1 + \frac{a_z(t)}{g}\right) \beta_4 - K_7 \alpha_1^2 + K_9 \beta_1 \alpha_1 &= 0. \end{aligned} \quad (2.35)$$

Вихідні дані в бланку:

$$\beta_k(0) = 0, \quad \alpha_k(0) = 0, \quad k = 1, 4, 5 \quad (2.36)$$

були додані для отримання унікального рішення (2.35).

Моделювання плескань рідини в твердих резервуарах за допомогою нечітких методів

Для того, щоб мати справу з невизначеністю, що виникає в параметрах землетрусу, нечіткий підхід став все частіше використовуватися¹²⁸. Нечітка логіка була включена для очищення

¹²⁷ Tang L., Zhang M., Wen L. Support vector machine classification of seismic events in the Tianshan orogenic belt. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2020. 125. e2019JB018132. URL: <https://doi.org/10.1029/2019JB018132> [2].

¹²⁸ Gnitko V., Degtyariev K., Karaiev A., Strelnikova E., Multi-domain boundary element method for axisymmetric problems in potential theory and linear isotropic elasticity, *WIT Transactions on Engineering Sciences*. WIT Press. 2019. P. 13–25. URL: <https://doi.org/10.2495/BE410021> [218]; Strelnikova E., Kriutchenko

невизначеної інформації, коли необхідно оцінити один або більше невизначених вихідних параметрів (наприклад, висоту вільної поверхні), що включає деякі невизначені вхідні параметри (інтенсивність землетрусу, параметри акселерограми). При цьому невизначені вхідні параметри можуть бути фазифіковані різними способами.

Для сейсмічного аналізу необхідно мати два види акселерограм для горизонтальної та вертикальної складових сейсмічного збудження. Ці акселерограми описуються функціями $a_x(t)$, $a_z(t)$.

Наприклад, наступні презентації функцій $a_x(t)$, $a_z(t)$ можна використовувати

$$a_x(t) = a_h a_x(t), \quad a_z(t) = a_v a_z(t). \quad (2.37)$$

Це дозволяє вводити нечіткі параметри a_h та a_v що характеризують інтенсивність землетрусу.

Таким чином, нечіткий підхід був застосований для усунення невизначеності сейсмічної інтенсивності.

Сейсмічний вплив було визначено за допомогою спектрально-сумісних акселерограм із різними піковими прискореннями землі (PGA) у поздовжньому та поперечному напрямках.

Було визначено нечіткі пікові прискорення землі з урахуванням максимальної невизначеності $\pm 30\%$ від детермінованого значення пікових прискорень землі.

Логічна змінна w була введена наступним чином:

$$w = \begin{cases} 1, & c - a \leq x \leq c + a, \\ \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2.38)$$

D., Gnitko V., Degtyarev K. Boundary element method in nonlinear sloshing analysis for shells of revolution under longitudinal excitations. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2020. Vol. 111. P. 78-87. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2019.10.008> [22]; Degtyariv K., Gnitko V., Kononenko Y., Kriutchenko D., Sierikova O., Strelnikova E. Fuzzy Methods for Modelling Earthquake Induced Sloshing in Rigid Reservoirs. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2022. P. 297-302. URL: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916466> [54]; Gnitko V., Degtyariv K., Naumenko V., Strelnikova E. BEM and FEM analysis of the fluidstructure interaction in tanks with baffles, *Int. Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. 2017. Vol. 5 (3). P. 317–328. URL: <https://doi.org/10.2495/CMEM-V5-N3-317-328> [156]; Zheng Jh., Xue M. A., Dou P., et al. A review on liquid sloshing hydrodynamics. *J Hydrodyn*. 2021. Vol. 33. P. 1089–1104. URL: <https://doi.org/10.1007/s42241-022-0111-7> [157].

Тоді симетричну трикутну функцію належності можна було б записати у такому вигляді (Рисунок 2.8):

$$\mu(x) = w\left(\frac{a-|x-c|}{a}\right). \quad (2.39)$$

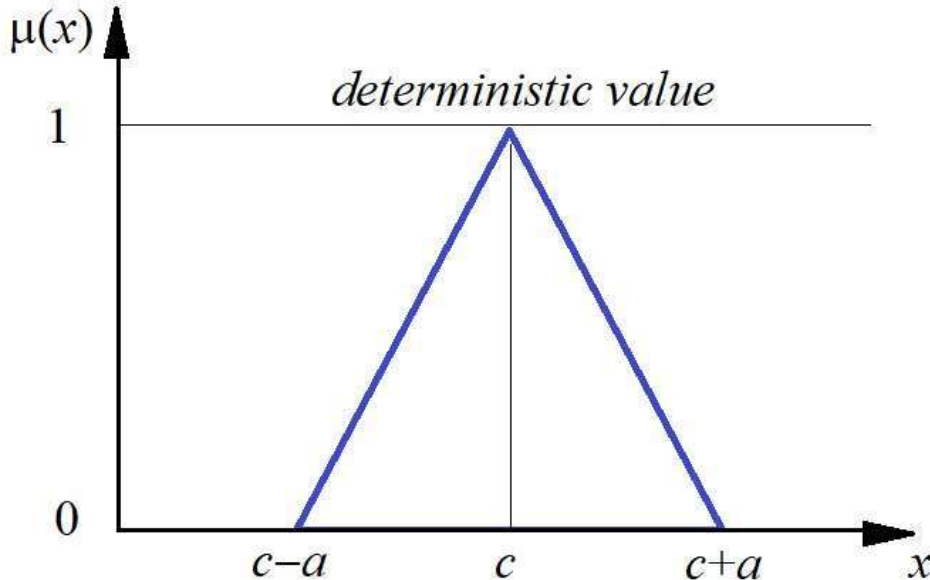


Рисунок 2.8 – Трикутна симетрична функція належності

У цьому дослідженні детерміновані вхідні значення a_h та a_v були фазифіковані за допомогою трикутних симетричних функцій належності $\mu(a_h)$ та $\mu(a_v)$, визначається як (2.39), рисунок 2.8.

По-перше, було розв'язано чіткі системи звичайних диференціальних рівнянь як у лінійних (2.32), (2.33), так і в нелінійних (2.35), (2.36) формулюваннях. Потім вхідні змінні a_h і a_v були розмиті, а нечіткі звичайні стохастичні диференціальні рівняння, як y^{129} , були застосовані тут до невизначених динамічних процесів.

2.3. Моделювання динамічних характеристик оболонкових конструкцій

Для формулювання задачі використані рівняння руху в

¹²⁹ Старостенко В., Кендзера О., Сафронов О. Основні напрямки розвитку геофізичних досліджень у галузі оцінки сейсмічної небезпеки території України. *Вісник Київського національного ун-ту ім. Тараса Шевченка: Геологія*. 2011. № 52 [137].

переміщеннях, які були отримані з рівнянь рівноваги у напруженнях з використанням закону Гука.

З урахуванням закону Гука рівняння руху в переміщеннях мають вигляд

$$\mu \Delta u_j^e + (\lambda + \mu) \frac{\partial \vartheta^e}{\partial x_j} + X_j = \rho \frac{\partial^2 u_j^e}{\partial t^2},$$

$$\vartheta^e = \operatorname{div} \mathbf{u}^e = \frac{\partial u_1^e}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2^e}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3^e}{\partial x_3} \quad j=1,2,3, \quad (2.40)$$

де λ, μ – коефіцієнти Ляме.

Для розв'язання рівнянь руху (2.40) застосовуємо метод зважених нев'язок. Невідомі подаємо у вигляді рядів за базисом з

фінітних функцій $\{\Psi_n\}_{n=1}^{N_1}$; як пробні використовуємо функції з цього ж базису. Після інтегрування отриманого співвідношення за об'ємом та зведення частки об'ємних інтегралів до поверхневих отримуємо скінченно-елементне формулювання зазначеної задачі у вигляді

$$[M_S] \ddot{\mathbf{u}}^e + [C_S] \dot{\mathbf{u}}^e + [K_S] \mathbf{u}^e = \{\mathbf{f}_S\} + \{\mathbf{f}_{pr}\} \quad (2.41)$$

де $[M_S], [C_S], [K_S]$ – матриці мас, демпфування та жорсткості, відповідно, $\{\mathbf{f}_S\}$ – вектор заданих зусиль, що діють на пружне тіло, $\{\mathbf{f}_{pr}\}$ – вектор зусиль, що характеризують тиск рідини на змочені поверхні пружного тіла. Для визначення вектору $\{\mathbf{f}_{pr}\}$ перейдемо до формулювання початково-крайової задачі з механіки рідини. Для опису рідини використовуються аналогічні рівняння руху. Використовуємо закони збереження маси та імпульсу з об'ємними силами $\mathbf{b}$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\operatorname{div}(\rho \mathbf{V}_f) + Q, \quad \rho \frac{d\mathbf{V}_f}{dt} = \rho \mathbf{b} + \operatorname{div}(\boldsymbol{\sigma}_f), \quad (2.42)$$

де $\mathbf{V}_f$ – вектор швидкості, ρ – густина рідини, Q – джерело мас, t – час.

Тензор напружень визначаємо таким чином:

$$\boldsymbol{\sigma}_f = -\left(p + \frac{2}{3}\mu\right)\mathbf{I} + \dot{\mathbf{S}}, \quad \frac{\partial p}{\partial \rho} = c^2, \quad (2.43)$$

де $\dot{\mathbf{S}}$ - дівіатор швидкостей деформації, c – швидкість звуку в середовищі.

З (2.42) маємо наближені рівності

$$\operatorname{div} \mathbf{V}_f = -\frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{Q}{\rho_0},$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}_f}{\partial t} = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p + \frac{\mu}{3\rho_0} \nabla \operatorname{div} \mathbf{V}_f + \frac{\mu}{\rho_0} \Delta \mathbf{V}_f.$$

Тут ρ_0 - середнє значення густини рідини, відносно якого відбувається лінеаризація. За припущенням відсутності джерел та масових сил отримуємо хвильове рівняння в акустичному наближенні

$$\frac{1}{\rho_0 c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = \frac{1}{\rho_0} \operatorname{div}(\nabla p) + \frac{4\mu}{3\rho_0^2 c^2} \operatorname{div}\left[\nabla\left(\frac{\partial p}{\partial t}\right)\right] = 0 \quad (2.44)$$

Дискретизацію рівняння (2.44) здійснюємо за допомогою метода скінченних елементів з використанням методу зважених нев'язок. Отримуємо

$$\begin{aligned} \iiint_{\Omega_f} \frac{1}{\rho_0 c^2} w \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} d\Omega_f + \iiint_{\Omega_f} \nabla w \cdot \left(\frac{4\mu}{3\rho_0^2 c^2} \nabla \frac{\partial p}{\partial t} \right) d\Omega_f + \iiint_{\Omega_f} \nabla w \cdot \left(\frac{1}{\rho_0} \nabla p \right) d\Omega_f = \\ = - \iint_{\Gamma_f} w \mathbf{n} \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{u}_f}{\partial t^2} d\Gamma_f. \end{aligned} \quad (2.45)$$

Будуємо скінченно-елементні апроксимації для тиску та переміщень у вигляді

$$p = \{N\} \{p_f\}, \quad \mathbf{u} = \{N^u\} \{u_f\}, \quad (2.46)$$

де $p = \{N\}, \{N^u\}, \{p_f\}, \{u_f\}$ - функції форми для тиску,

переміщень та відповідні вузлові значення невідомих. Приходимо до скінченно-елементного формулювання задачі

$$[\mathbf{M}_f] \{\ddot{p}_f\} + [\mathbf{C}_f] \{\dot{p}_f\} + [\mathbf{K}_f] \{p_f\} + \rho_0 [\mathbf{R}]^T \{\ddot{u}_f\} = 0,$$

де $[M_f], [C_f], [K_f]$ - матриці мас, демпфування та жорсткості, відповідно, $\{R\}$ - акустична гранична матриця, яка обчислюється за формулою

$$\{R\}^T = \iint_{\Gamma_f} \{N\} \{n\}^T \{N^u\}^T d\Gamma_f.$$

Переходимо до зв'язаної задачі гідро-пружної взаємодії. На змоченій поверхні будемо мати

$$\sigma_s n + p n = 0, \quad n u_s = n u_f. \quad (2.47)$$

На вільній поверхні рідини Γ_0 використовуємо динамічну та кінематичну умови, з яких отримуємо матрицю $[S_f]$. Отримуємо дискретну модель

$$\begin{bmatrix} [M_s] & 0 \\ \rho_0 [R] & [M_f] + [S_f] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}^e \\ \ddot{p}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_s] & 0 \\ 0 & [C_f] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}^e \\ \dot{p}_f \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_s] & -[R] \\ 0 & [K_f] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u^e \\ p_f \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_s \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (2.48)$$

що дозволяє враховувати рух вільної поверхні при розв'язанні зв'язаної задачі гідропружності в лінійному формулюванні. Метод зважених нев'язок було також застосовано до граничних умов задачі безвихрового руху нев'язкої нестисливої рідини, з використанням пробних функцій, що задовольняють рівнянню Лапласа. Це дало змогу отримати гранично-скінченно-елементне формулювання задачі. Зауважимо, що отримані при цьому диференціальні рівняння також мають форму (2.48), елементи матриць $[M_s], [C_s], [K_s]$ визначаються методом скінченних елементів (МСЕ), а елементи матриць $[M_f], [K_f]$ в задачі руху рідини обчислюються як сингулярні поверхневі інтеграли з використанням методу граничних елементів (МГЕ)¹³⁰.

Далі розглянуто циліндричні оболонки. Вважалось, що висота типової оболонки дорівнювала $L = 1.0$ м, її радіус складав $R = 1$ м, а товщина $h = 0.01$ м; оболонки заповнювались рідиною (нафта) на рівень

¹³⁰ Sierikova O., Strelnikova E., Degtyarev K. Seismic Loads Influence Treatment on the Liquid Hydrocarbon Storage Tanks Made of Nanocomposite Materials. *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*. 2022. Vol. 17. P. 62-70. URL: <https://doi.org/10.37394/232011.2022.17.9> [55].

$H = 1.0$ м. Розглядались оболонки із жорстко закріпленим дном по всій площині та лише по його контуру, при дослідженні плескань враховувались гравітаційні сили з прискоренням $g = 9,812 \text{ м/с}^2$.

2.4. Моделювання демпфування коливань рідких вуглеводнів в резервуарах за допомогою встановлення мембран

Оцінку сейсмічної міцності проводили наступним чином. На першому етапі за методиками, розробленими в роботах автора та інших дослідників¹³¹, визначено частоти та режими власних коливань резервуара.

Далі визначено модель інерційних сейсмічних навантажень на конструкцію.

Аналіз експериментальних досліджень сейсмостійкості в роботі показав, що зазвичай лише найнижчі власні частоти коливань знаходяться в області сейсмічного резонансу. Вищі власні частоти значно віддалені від області сейсмічного резонансу. Зазвичай вже друга власна частота вище верхньої межі спектра.

Так в роботах¹³², встановлено, що нижні частоти коливань ємності з рідиною при заданих механічних і геометричних

¹³¹ Degtyariv K., Gnitko V., Kononenko Y., Kriutchenko D., Sierikova O., Strelnikova E. Fuzzy Methods for Modelling Earthquake Induced Sloshing in Rigid Reservoirs. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2022. P. 297-302. URL: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916466> [54].

¹³² Липовий В. О., Удянський М. М. Техногенні ризики забруднення довкілля під час експлуатування та ремонтних робіт резервуарів з нафтопродуктами. Харків : НУГЗУ. 2017. 107 с. [150]; Medvedovskaya T., Strelnikova E., Medvedyeva K. Free hydroelastic vibrations of hydroturbine head covers. *Int. J. Eng. and Advanced Research Technology*. 2015. Vol. 1. № 1. P. 45–50 [151]; Серікова О. М., Стрельнікова О. О., Крютченко Д. В. Оцінка сили сейсмічних навантажень на резервуари для збереження отруйних та легкозаймистих рідин. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*. 2021. Вип. 51. С. 70-80. URL: <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2021-51-08> [152]; Gnitko V., Degtyariv K., Karaiev A., Strelnikova E., Multi-domain boundary element method for axisymmetric problems in potential theory and linear isotropic elasticity, *WIT Transactions on*

характеристиках є частотами плескання. Розділені частотні спектри коливань вільної поверхні та пружних стінок.

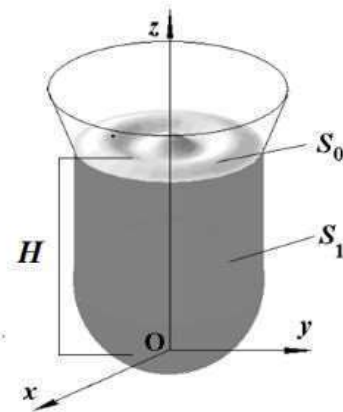
В даній роботі досліджено вимушені коливання при заданому сейсмічному навантаженні.

Тут розглядаються коливання рідини з і без покриття вільної поверхні.

У роботі розглянуто питання про коливання рідини в довільній оболонці обертання.

По-перше, частоти та режими власних коливань резервуара були визначені за допомогою методів граничних елементів.

Змочену поверхню оболонки позначено S_1 , а вільну поверхню S_0 (Рисунок 2.9). Як модель нафтоховища розглядається циліндрична оболонка з плоским дном, частково заповнена рідиною.



Engineering Sciences. WIT Press. 2019. P. 13–25. URL: <https://doi.org/10.2495/BE410021> [153]; Strelnikova E., Kriutchenko D., Gnitko V., Degtyarev K. Boundary element method in nonlinear sloshing analysis for shells of revolution under longitudinal excitations. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2020. Vol. 111. P. 78-87. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2019.10.008> [154]; Degtyariov K., Gnitko V., Kononenko Y., Kriutchenko D., Sierikova O., Strelnikova E. Fuzzy Methods for Modelling Earthquake Induced Sloshing in Rigid Reservoirs. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2022. P. 297-302. URL: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916466> [155]; Gnitko V., Degtyariov K., Naumenko V., Strelnikova E. BEM and FEM analysis of the fluidstructure interaction in tanks with baffles, *Int. Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. 2017. Vol. 5 (3). P. 317–328. URL: <https://doi.org/10.2495/CMEM-V5-N3-317-328> [156]; Zheng Jh., Xue M. A., Dou P., et al. A review on liquid sloshing hydrodynamics. *J Hydrodyn*. 2021. Vol. 33. P. 1089–1104. URL: <https://doi.org/10.1007/s42241-022-0111-7> [157].

Рис 2.9. Оболонка обертання.

Вважалося, що декартова система координат $Oxyz$, пов'язана з оболонкою, вільна поверхня рідини S_0 збігається з площиною спокою $z=H$. Передбачається, що рідина ідеальна, нестислива, а її рух, що почався в стані спокою, є безвихровим. За цих умов існує потенціал для швидкостей рідини, який задовольняє рівняння Лапласа:

$$V_x = \frac{\partial \Phi}{\partial x}; \quad V_y = \frac{\partial \Phi}{\partial y}; \quad V_z = \frac{\partial \Phi}{\partial z}, \quad (2.49)$$

Значення тиску p на стінки оболонки визначено з лінеаризованого інтеграла Бернуллі за формулою:

$$p = -\rho_l \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + gz \right) + p_0 + a_s(t)x, \quad (2.50)$$

де Φ – потенціал швидкості, g – прискорення сили тяжіння, z – координата точки рідини, виміряна у вертикальному напрямку, ρ_l – густина рідини, p_0 – атмосферний тиск, $a_s(t)$ – функція, що характеризує зовнішній вплив (горизонтальне сейсмічне прискорення). У рівнянні (2.50) значення gz є гравітаційним потенціалом, і тому згідно¹³³, на вільній поверхні тиск еквівалентний тиску навколишнього середовища, тобто. $p = p_0$.

Отже, на вільній поверхні рідини повинні виконуватися такі кінематичні та динамічні умови:

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{n}} \right|_{S_0} = \frac{\partial \zeta}{\partial t}; \quad p - p_0|_{S_0} = 0, \quad (2.51)$$

де функція ζ описує форму і положення вільної поверхні.

Таким чином, для потенціалу швидкості отримано наступну крайову задачу

$$\nabla^2 \Phi = 0; \quad \left. \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{n}} \right|_{S_1} = 0; \quad \left. \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{n}} \right|_{S_0} = \frac{\partial \zeta}{\partial t}; \quad p - p_0|_{S_0} = 0; \quad \left. \frac{\partial \Phi}{\partial t} + g\zeta + a_s(t)x \right|_{S_0} = 0 \quad (2.52)$$

Визначили потенціал швидкостей Φ і функцію ζ , встановлено висоту підйому вільної поверхні та визначено тиск рідини на стінки оболонки.

Було представлено потенціал Φ у формі

¹³³ Ibrahim R. A., Pilipchuck N., Ikeda T. Recent Advances In Liquid Sloshing Dynamics. *Applied Mechanics Reviews*. 2001. Vol. 54. № 2. P. 133–199. URL: <https://doi.org/10.1115/1.3097293> [132]; Ibrahim R. A. Liquid Sloshing Dynamics. Cambridge University Press, New York. 2005 [133].

$$\Phi = \sum_{k=1}^M \dot{d}_k \phi_k. \quad (2.53)$$

Для функцій ϕ_k , розглянуто наступні крайові задачі:

$$\nabla^2 \phi_k = 0, \quad \left. \frac{\partial \phi_k}{\partial \mathbf{n}} \right|_{S_1} = 0, \quad (2.54)$$

$$\left. \frac{\partial \phi_k}{\partial \mathbf{n}} \right|_{S_0} = \frac{\partial \zeta}{\partial t}; \quad \frac{\partial \phi_k}{\partial t} + g\zeta = 0. \quad (2.55)$$

Було диференційовано друге співвідношення в рівнянні (2.53) t і підставляємо в отриману рівність $\frac{\partial \zeta}{\partial t}$ з першого співвідношення.

Далі це було представлено як функції ϕ_k як $\phi_k(x, y, z, t) = \exp(i\chi_k t) \phi_k(x, y, z)$. Отримано задачу власних значень, і на вільній поверхні буде виконуватися наступна рівність

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial n} = \frac{\chi_k^2}{g} \phi_k. \quad (2.56)$$

Для рівня вільної поверхні отримано вираз:

$$\zeta = \sum_{k=1}^M d_k \frac{\partial \phi_k}{\partial n}. \quad (2.57)$$

У циліндричній системі координат вирази для шуканих функцій отримали наступним чином

$$\phi_k(r, z, \theta) = \phi_k(r, z) \cos \alpha \theta \quad (2.58)$$

Тут α є гармонічне число. Таким чином, окремо розглянуто частоти та моди вільних коливань для різних α .

Він був представлений Φ як сума потенціалів простого та подвійного шарів

$$2\pi\Phi(P_0) = \iint_S \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{n}} \frac{1}{|P-P_0|} dS - \iint_S \Phi \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} \frac{1}{|P-P_0|} dS. \quad (2.59)$$

Тут $S = S_1 \cup S_0$; точки P та P_0 належать поверхні S , та $|P-P_0|$ це декартова відстань між точками P та P_0 . Рівняння (11) є наслідком третьої тотожності Гріна у випадку, коли точка P_0 належить до поверхні S . Це інтегральна форма рівняння Лапласа, і вона буде використана тут у чисельній реалізації методу граничних елементів.

Задовольняючи граничні умови в (2.54) і (2.55), було створено наступну систему інтегральних рівнянь:

$$\begin{cases} 2\pi\varphi_1 + \iint_{S_1} \varphi_1 \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) dS_1 - \frac{\chi^2}{g} \iint_{S_0} \varphi_0 \frac{1}{r} dS_0 + \iint_{S_0} \varphi_0 \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \right) dS_0 = 0, \\ - \iint_{S_1} \varphi_1 \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) dS_1 - 2\pi\varphi_0 + \frac{\chi^2}{g} \iint_{S_0} \varphi_0 \frac{1}{r} dS_0 = 0. \end{cases} \quad (2.60)$$

Тут для зручності значення потенціалу на вільній поверхні позначено як φ_0 , та як φ_1 на стінках оболонки.

Знайдено розв'язок системи (2.60) у вигляді (2.58).

Для вирішення цієї системи сингулярних інтегральних рівнянь у роботах¹³⁴ застосовано метод граничних елементів.

Таким чином, визначено режими та частоти власних коливань бака. Надалі ці режими розглядаються як основні функції.

Наступний етап дослідження був присвячений моделюванню вимушених коливань. Для визначення основних співвідношень для d_k у рівнянні (2.57) було замінено базові функції у вирази для рівняння потенціалу швидкості (2.53) і рівняння форми вільної поверхні (2.57). Отриманий ряд підставлено в граничну умову на вільній поверхні¹³⁵:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + (g + a_z(t))\zeta + a_x(t)x \Big|_{s_0} = 0.$$

Оскільки в циліндричній системі координат, $x = r \cos \theta$, буде лише перша гармоніка, тобто у формулі (2.54) враховано лише її $\alpha=1$. Далі була проведена кореляція на вільній поверхні S_0

$$\sum_{k=1}^M \ddot{d}_k \phi_k + (g + a_z(t)) \sum_{k=1}^M d_k \frac{\partial \phi_k}{\partial n} + a_x(t)r = 0.$$

Але на поверхні S_0 співвідношення (2.56) також виконано. Тоді вказана рівність набуде вигляду:

$$\sum_{k=1}^M \ddot{d}_k \phi_k + (g + a_z(t)) \sum_{k=1}^M \frac{\chi_k^2}{g} d_k \phi_k + a_x(t)r = 0. \quad (2.61)$$

Помноживши рівняння (2.57) скалярно на ϕ_l ($l = \overline{1, M}$) і використовуючи ортогональність власних форм, отримано систему звичайних диференціальних рівнянь другого порядку

¹³⁴ Dadashov I., Loboichenko V., Kireev A. Analysis of the ecological characteristics of environment friendly fire fighting chemicals used in extinguishing oil products. *Pollution Research*. 2018. Vol. 37 (1). P. 63–77 [146].

¹³⁵ Zheng Jh., Xue M. A., Dou P., et al. A review on liquid sloshing hydrodynamics. *J Hydrodyn*. 2021. Vol. 33. P. 1089–1104. URL: <https://doi.org/10.1007/s42241-022-0111-7> [157]; Raynovskyy I. A., Timokha A. N. Sloshing in Upright Circular Containers: Theory, Analytical Solutions, and Applications. CRC Press/Taylor & Francis Group. 2020. 170 p. [158]; Nahornyi V. V., Shevchenko A. V., Lyashchuk V. I., et al. Hydrogeodeformation monitoring as a tool for earthquake prediction in the Dnieper-Krivoy Rog aulacogen. *Journal of Geodynamics*. 2020. Vol. 136. P. 101718 [159]; Венгерський П. С. Чисельне моделювання руху поверхневих і ґрунтових потоків та їх взаємодія на території водозбору : автореф. дис. ... д-ра фіз.-мат. наук : 01.05.02. Львів, 2017 [160]; Li Y., Zhang G., Wang H., et al. Monitoring of groundwater level changes and its relationship with tectonic activities in the North China Plain. *Engineering Geology*. 2023. Vol. 282. P. 106135 [161].

$$\ddot{d}_k + \frac{\chi_k^2}{g}(g + a_z(t))d_k + a_x(t)F_k = 0, \quad F_k = \frac{(r, \phi_k)}{(\phi_k, \phi_k)}, \quad k = \overline{1, M}. \quad (2.62)$$

Передбачається, що перед горизонтальним навантаженням резервуар перебував у спокої. Тоді рівняння (2.62) було розв'язано за нульових початкових умов. Для розв'язування системи (2.62) використано чисельний метод, як і в роботах¹³⁶. Цей чисельний розв'язок дозволяє нам отримати історію зв'язку для рівня вільної поверхні ζ , а також тиск p , отримані за формулою:

$$p = -\rho_l \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + (g + a_z(t))\zeta \right) + p_0 + a_x(t)x. \quad (2.63)$$

З рівняння (2.63) можна зробити висновок, що у випадку горизонтального сейсму лише перша гармоніка вносить внесок у досліджувані значення ζ та P .

Враховуючи нелінійне плескання та пов'язані вертикальні та горизонтальні збудження, необхідно використовувати рівняння Бернуллі

$$p - p_0 = -\rho_l \left[\frac{\partial \Phi}{\partial t} + a_x(t)x + (g + a_z(t))\zeta + \frac{1}{2}(\nabla \Phi, \nabla \Phi) \right], \quad (2.64)$$

де $a_x(t)$ та $a_z(t)$ вертикальні та горизонтальні рушійні сили прискорення.

2.5. Моделювання впливу обводненості ґрунту на стійкість резервуарів в умовах сейсмічної активності

У роботах автора¹³⁷ встановлено і доведено, що у великих містах вплив техногенних факторів поповнення підземних вод у кілька разів

¹³⁶ Jing H., Chen H., Yang J., Li P. Shaking table tests on a small-scale steel cylindrical silo model in different filling conditions. *Structures*. 2022. Vol. 37. P. 698–708 [162]; Mansour S., Pieraccini L., Palermo M., Foti D., Gasparini G., Trombetti T., Silvestri S. Comprehensive Review on the Dynamic and Seismic Behavior of Flat-Bottom Cylindrical Silos Filled with Granular Material. *Front. Built Environ.* 2022. 7. 805014 [163].

¹³⁷ Серікова О. М., Стрельнікова О. О., Колосков В. Ю. Підвищення рівня екологічної безпеки забудованих територій України, схильних до підтоплення : монографія. Харків : НУЦЗ України, 2020. 142 с. [63].

перевищує природний. Тому важливо враховувати природні та техногенні фактори впливу на ґрунтові води, створювати математичні моделі та прогнози з їх урахуванням. Двовимірне та тривимірне моделювання процесів зміни рівня ґрунтових вод (РГВ) дозволить більш чітко та об'єктивно враховувати параметри впливу на зміну РГВ у довгостроковому прогнозуванні.

У багатьох містах України значну площу займають штучні покриття та споруди, які перешкоджають природним процесам інфільтрації, випаровування та транспірації опадів. Тому при моделюванні змін рівнів ґрунтових вод враховується існування таких ділянок, частково вкритих штучним покриттям, де вплив природних і техногенних факторів відбуватиметься лише на незабудованій поверхні цієї території.

У зв'язку з тим, що провідність в анізотропних ґрунтах у різних напрямках є різною, то якщо структура пористого середовища така, що воно має більшу провідність в одному напрямку, ніж в інших, виникає необхідність враховувати зміни рівня ґрунтових вод в тривимірному моделюванні. Для прогнозування змін рівня ґрунтових вод була розроблена математична модель, яка враховує інфільтрацію атмосферних вод, додаткове живлення ґрунтових вод, транспірацію, випаровування, евапотранспірацію та водозабір ґрунтових вод.

2.5.1. Одновимірний випадок моделювання рівня ґрунтових вод

Далі було розглянуто одновимірний випадок:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = a \frac{\partial^2 U}{\partial x^2};$$

Початкові умови:

$$U(x, 0) = 0 \quad (2.65)$$

Граничні умови:

$$U(0, t) = g(t); \frac{\partial U}{\partial x} \big|_{x=l} = 0; \quad (2.66)$$

Надано заміну:

$$\begin{aligned} U(x, t) &= \tilde{U}(x, t) + g(t). \\ \text{Тоді: } U(x, 0) &= \tilde{U}(x, 0) + g(0) \\ \tilde{U}(x, 0) &= -g(0) \\ U(0, t) &= \tilde{U}(0, t) + g(t) = g(t) \\ \tilde{U}(0, t) &= 0; \end{aligned}$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} \Big|_{x=l} = \frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} \Big|_{x=l} = 0; \quad (2.67)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial \tilde{u}}{\partial t} + g'_t(t); \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial t^2}; \quad (2.68)$$

Для $\tilde{U}(x, t)$ було отримано крайову задачу:

$$\begin{cases} \frac{\partial \tilde{u}}{\partial t} + g'_t(t) = a \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial x^2} \\ \tilde{U}(x, 0) = -g(0) \\ \frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} \Big|_{x=l} = 0; \tilde{U}(0, t) = 0 \end{cases} \quad (2.69)$$

Розв'язано однорідне рівняння методом Фур'є:

$$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial x^2}; \tilde{U}(0, t) = 0; \frac{\partial \tilde{u}}{\partial x} \Big|_{x=l} = 0; \quad (2.70)$$

$$\tilde{U}(x, 0) = -g(0)$$

Змінні були розділені:

$$\tilde{U}(x, t) = X(x) \cdot T(t) \quad (2.71)$$

Це було замінено в (6):

$$X \cdot T' = aX''T$$

$$\frac{X''}{X} = \frac{T'}{aT} = -\lambda; (\lambda > 0)$$

Було вирішено:

$$\frac{X''}{X} = -\lambda; X'' + \lambda X = 0;$$

$$X(x) = C_1 \sin \sqrt{\lambda} x + C_2 \cos \sqrt{\lambda} x;$$

$$X(0) = 0; C_2 = 0;$$

$$X' \Big|_{x=l} = C_1 \sqrt{\lambda} \cos \sqrt{\lambda} x \Big|_{x=l} = 0$$

$$\cos \sqrt{\lambda} l = 0$$

$$\sqrt{\lambda} l = \frac{\pi}{2} + \pi k;$$

$$\lambda_k = \left(\frac{\frac{\pi}{2} + \pi k}{l} \right)^2 = \left[\frac{\pi(\frac{1}{2} + k)}{2l} \right]^2$$

$$k=0,1,2...$$

$$X_k(x) = \sin \sqrt{\lambda_k} x$$

Для $T(t)$ було отримано:

$$\frac{T'}{aT} = -\lambda_k$$

$$T' + \lambda_k aT = 0$$

$$T_k = e^{-a\lambda_k t}$$

$$\tilde{U}_k = e^{-a\lambda_k t} \cdot \sin \sqrt{\lambda_k} x$$

Загальне рішення:

$$U = \sum_{k=0}^{\infty} C_k e^{-a\lambda_k t} \sin\sqrt{\lambda_k} x$$

$$\text{де } \lambda_k = \left[\frac{\pi(1+2k)}{2l} \right].$$

Неоднорідне рівняння розв'язано:

$$\frac{\partial \tilde{U}}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \tilde{U}}{\partial x^2} - g'(t) \quad (2.72)$$

$$\tilde{U}(x, 0) = -g(0) \quad (2.73)$$

$$\frac{\partial \tilde{U}}{\partial x} \Big|_{x=l} = 0; \quad (2.74)$$

$$\tilde{U}(0, t) = 0 \quad (2.75)$$

Рішення буде знайдено в наступній формі:

$$\tilde{U}(x, t) = \sum_{k=0}^{\infty} C_k(t) e^{-a\lambda_k t} \sin\sqrt{\lambda_k} x \quad (2.76)$$

Це рішення у будь-якому випадку $C_k(t)$ задовольняє (2.74) та (2.75).

(2.76) було замінено на (2.73):

$$\begin{aligned} \sum \dot{C}_k e^{-a\lambda_k t} \sin\sqrt{\lambda_k} x - C_k a \lambda_k e^{-a\lambda_k t} \sin\sqrt{\lambda_k} x = \\ = -a \sum C_k e^{-a\lambda_k t} \lambda_k \sin\sqrt{\lambda_k} x - g'(t) \end{aligned} \quad (2.77)$$

1 у ряд Фур'є було розкладено на $(0, l)$ поспіль $\sin\sqrt{\lambda_k} x$:

$$b_k = \frac{2}{l} \int_0^l \sin \frac{\pi(2k+1)x}{2l} dx = -\frac{2}{l} \cdot \frac{2l}{\pi(2k+1)} \cos \frac{\pi(2k+1)x}{l} \Big|_0^l = \frac{4}{\pi(2k+1)};$$

$$\text{So, } g'(t) = 4 \sum \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} + \pi k\right)x}{\pi + 2\pi k} \cdot g'(t)$$

Це значення було замінено на (2.76):

$$\sum_{k=0}^{\infty} \dot{C}_k e^{-a\lambda_k t} \sin\sqrt{\lambda_k} x = 4 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2} + \pi k\right)x}{\pi + 2\pi k} \cdot g'(t)$$

Звідси:

$$\dot{C}_k = -\frac{4}{\pi + 2\pi k} \cdot g'(t) e^{a\lambda_k t}$$

Так:

$$C_k(t) = -\frac{4}{\pi(2k+1)} \int_0^t g'(\tau) e^{a\lambda_k \tau} d\tau + C_k(0);$$

Таким чином, рішення (5), (7,8)

$$\begin{aligned} \tilde{U}(x, t) = \sum_{k=0}^{\infty} \left[-\frac{4}{\pi(2k+1)} \left(\int_0^t g'(\tau) e^{a\lambda_k \tau} d\tau + C_k(0) \right) \right] \cdot e^{-a\lambda_k t} \\ \cdot \sin\sqrt{\lambda_k} x \end{aligned}$$

що задовольняє Eq (10).

Задовольнимо рівняння (6):

$$\tilde{U}(x, 0) = \sum \frac{-4}{\pi(2k+1)} C_k(0) \sin \sqrt{\lambda_k} x = -g(0) \sum \frac{4}{\pi(2k+1)} \sin \sqrt{\lambda_k} x$$

Звідси $C_k(0) = g(0)$

Так:

$$\tilde{U}(x, t) = \sum \left[\frac{-4}{\pi(2k+1)} \int_0^t (g'(\tau) e^{-a\lambda_k(t-\tau)}) d\tau + g(0) e^{-a\lambda_k t} \right] \sin \sqrt{\lambda_k} x.$$

Таким чином, отримано розв'язок вихідного рівняння у вигляді:

$$U(x, t) = g(t) + \sum_{k=0}^{\infty} \left[\frac{-4}{\pi(2k+1)} \int_0^t (g'(\tau) e^{-a\lambda_k(t-\tau)}) d\tau + g(0) e^{-a\lambda_k t} \sin \sqrt{\lambda_k} x \right],$$

де

$$\lambda_k = \left[\frac{\pi(1+2k)}{2l} \right]^2, k = 0, 1, 2 \dots$$

Також у стаціонарному випадку розроблено двовимірну та тривимірну математичну модель зміни рівня ґрунтових вод у містах¹³⁸.

На основі рівняння Муфтахова А.Ж. розроблено математичну модель, яка дозволила отримати розв'язок сформульованої задачі в закритій аналітичній формі (у вигляді рядів). Було візуалізовано результати та підтверджено раніше отримані авторкою дані про вплив додаткового поповнення на рівень ґрунтових вод з використанням традиційного інженерного підходу¹³⁹.

Для моделювання математичної моделі було вибрано диференціальні рівняння та відповідні граничні умови для характеристики змін РГВ¹⁴⁰.

Були прийняті такі припущення:

- зміни РГВ мають стабільний характер, про що свідчать дані багаторічних досліджень Геологічної партії в 3 режимних свердловинах м. Харкова¹⁴¹;

¹³⁸ Серікова О. М., Стрельнікова О. О., Колосков В. Ю. Підвищення рівня екологічної безпеки забудованих територій України, схильних до підтоплення : монографія. Харків : НУЦЗ України, 2020. 142 с. [63].

¹³⁹ Там само [63].

¹⁴⁰ Там само [63].

¹⁴¹ Там само [63].

- розглянуто ділянки з однорідними гідрогеологічними умовами по одному з напрямків, що дозволяє використовувати рівняння плоскої фільтрації.

2.5.2. Моделювання процесів зміни рівня ґрунтових вод у 3d постановці

Розглянемо рівняння фільтраційного тиску у вигляді

$$\gamma^2 \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0, \quad (2.78)$$

Де h – рівень ґрунтових вод, x, y, z – координати, що показано на рисунку 2.10, γ – коефіцієнт анізотропії.

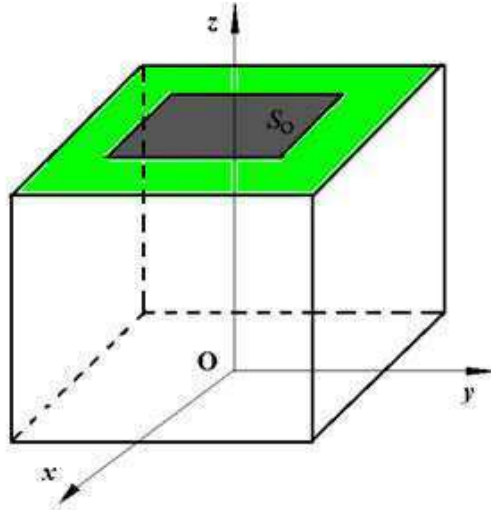


Рисунок 2.10 – Розрахункова зона для визначення РґВ

Сформульовано граничні умови для рівняння (2.78), які враховують наявність штучних покриттів, інфільтрацію, випаровування та транспірацію, а також ефект евапотранспірації. Цим умовам відповідають значення невідомої функції або її нормальної похідної на межах розрахункової області. В якості обчислювальної області прийнято прямокутний паралелепіпед. Нижня і верхня грані цього паралелепіпеда – прямокутники S зі сторонами $[2a, 2b]$. Висоту паралелепіпеда позначили як L . Нехай S_0 буде квадратом зі сторонами $[2l, 2l]$, яка розташована в центрі верхньої грані.

Припустимо, що на ділянці $S_1 = S \setminus S_0$ існує вплив природних і техногенних факторів на зміни РґВ; перебуваючи в області S_0 вплив на

рівень ґрунтових вод не відбувається через наявність штучних покриттів. Формулюються такі граничні умови, що характеризують наявність штучних покриттів:

$$\left. \frac{\partial h}{\partial y} \right|_{S_0} = 0. \quad (2.79)$$

На ділянці $S \setminus S_0$ є інфільтрація, водозабір, транспірація та випаровування, тому було отримано

$$\left. \frac{\partial h}{\partial y} \right|_{S_1, y=0} = f + s - g - d - k,$$

де f – додаткове живлення ґрунтових вод (прибуткова частина балансу ґрунтових вод); s – поповнення ґрунтових вод атмосферними водами (прибуткова частина балансу ґрунтових вод); g – інтенсивність транспірації (видаткова частина балансу ґрунтових вод); d – швидкість випаровування (видаткова частина балансу ґрунтових вод); k – водозабір ґрунтових вод (видаткова частина балансу ґрунтових вод).

Звернемося до умов, що враховують евапотранспірацію. Оскільки зміни РГВ та їх розподіл є локальними, а моделювання проводиться для обмежених ділянок міської території (промислові об'єкти, будівлі тощо), з однорідними гідрогеологічними умовами, можна вважати, що бічний приплив і відтік дорівнюють один одному.

Таким чином, була сформульована така крайова задача для визначення невідомої функції $h(x, y, z)$: необхідно знайти розв'язок диференціального рівняння (2.78) за таких граничних умов:

$$\left. \frac{\partial h}{\partial y} \right|_{S_0} = 0,$$

$$\left. \frac{\partial h}{\partial y} \right|_{S_1, y=-L} = f + s - g - d - k, \quad h|_{y=0} = 0,$$

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=l+a} = e_1(y), & \left. \frac{\partial h}{\partial x} \right|_{x=-l-a} = e_1(y), \\ \left. \frac{\partial h}{\partial z} \right|_{z=l+b} = e_1(y), & \left. \frac{\partial h}{\partial z} \right|_{z=-l-b} = e_1(y). \end{cases}$$

У цих рівняннях згідно [Венгерський] було отримано

$$e_1(y) = \frac{2}{1 + (y / y_{50})^\tau}, \quad (2.80)$$

де τ – відносна мінливість потенційної транспірації; y_{50} – параметр, що характеризує висоту капілярного водопоглинання; y – глибина, на якій виникає тиск поглинаючої вологи. У розрахунках значення $\tau \in \tau = 2,2$. У подальших розрахунках передбачається, що $y_{50} = 3$, тобто передбачалося, що $L = 6$ м. Якщо евапотранспірація не враховується, значення L обговорюється окремо. Початковий рівень був взятий за точку відліку $h|_{y=0} = 0$.

Зазначимо, що для даної крайової задачі з неоднорідними крайовими умовами на шостій межі неможливо побудувати єдину систему базових функцій. Тому в роботі пропонується шукати невідому функцію $h(x, y, z)$ у вигляді суми трьох доданків

$$h(x, y, z) = h_1(x, y, z) + h_2(x, y, z) + h_3(x, y, z).$$

Для кожної функції $h_i(x, y)$, $i = 1, 2, 3$ відповідає власна крайова задача, і в кожній із цих задач є однорідні граничні умови, що дає змогу будувати системи незалежних базисних функцій. Такий спосіб дозволяє не тільки побудувати розв'язок сформульованої граничної задачі, яка враховує наявність штучних покриттів, інфільтрацію, випаровування та транспірацію, а також ефект евапотранспірації, а й дослідити вплив штучних покриттів на і випаровування.

Проблема граничного значення для функції $h_1(x, y, z)$ описує наявність штучних покривів, інфільтрацію, випаровування та транспірацію, але не враховує ефект евапотранспірації залежно від глибини. Це питання було сформульовано так:

$$\gamma^2 \frac{\partial^2 h_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h_1}{\partial z^2} = 0 \quad (2.81)$$

$$\left. \frac{\partial h_1}{\partial y} \right|_{S_0} = 0,$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h_1}{\partial y} \Big|_{S_1, y = -L} &= f + s - g - d - k, \quad h_1 \Big|_{y=0} = 0 \\ \left\{ \begin{aligned} \frac{\partial h_1}{\partial x} \Big|_{x=l+a} &= 0, \quad \frac{\partial h_1}{\partial x} \Big|_{x=-l-a} = 0, \\ \frac{\partial h_1}{\partial y} \Big|_{z=l+b} &= 0, \quad \frac{\partial h_1}{\partial z} \Big|_{z=-l-b} = 0. \end{aligned} \right. \end{aligned}$$

Для функції $h_2(x, y, z)$ було отримано такі граничні значення задачі

$$\gamma^2 \frac{\partial^2 h_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h_2}{\partial z^2} = 0 \quad (2.82)$$

$$\frac{\partial h_2}{\partial y} \Big|_{S_0 \cup S_1, y=-L} = 0, \quad h_2 \Big|_{y=0} = 0,$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial h_2}{\partial x} \Big|_{x=l+a} &= e_1(y), \quad \frac{\partial h_2}{\partial z} \Big|_{z=-l-a} = e_1(y), \\ \frac{\partial h_2}{\partial y} \Big|_{y=l+b} &= 0, \quad \frac{\partial h_2}{\partial z} \Big|_{z=-l-b} = 0. \end{aligned} \right.$$

Аналогічно для функції $h_3(x, y, z)$ було отримано

$$\gamma^2 \frac{\partial^2 h_3}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h_3}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h_3}{\partial z^2} = 0 \quad (2.83)$$

$$\frac{\partial h_3}{\partial y} \Big|_{S_0 \cup S_1, y=-L} = 0, \quad h_3 \Big|_{y=0} = 0,$$

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial h_3}{\partial x} \Big|_{x=l+a} &= 0, \quad \frac{\partial h_3}{\partial x} \Big|_{x=-l-a} = 0, \\ \frac{\partial h_3}{\partial z} \Big|_{z=l+b} &= e_1(y), \quad \frac{\partial h_3}{\partial z} \Big|_{z=-l-b} = e_1(y). \end{aligned} \right.$$

Використовуючи метод, описаний у [Венгерський], було отримано наступні розв'язки граничних задач (2.81 – 2.83)

$$h_1^{mn} = E^{mn} \cos \frac{\pi m x}{2(l+a)} \cdot \cos \frac{\pi n z}{2(l+b)} \cdot \sinh \lambda_{mn} (y+L), \quad \lambda_{mn} = \frac{1}{2\gamma} \sqrt{\left(\frac{\pi m}{l+a}\right)^2 + \left(\frac{\pi n}{l+b}\right)^2} \quad m=1,2,\dots$$

$$h_2^{mn} = F^{mn} \sin \frac{\pi \gamma (0.5+m)(y+L)}{L} \cdot \sin \frac{\pi (0.5+n)z}{(l+b)} \cdot \sinh \lambda_{mn} x, \quad m,n=0,1,2,\dots$$

$$h_3^{mn} = G^{mn} \sin \frac{\pi \gamma (0.5+m)(y+L)}{L} \cdot \sin \frac{\pi (0.5+n)x}{(l+a)} \cdot \sinh \lambda_{mn} z, \quad m,n=0,1,2,\dots$$

$$h(x, y, z) = h_1(x, y, z) + h_2(x, y, z) + h_3(x, y, z)$$

$$h_i(x, y, z) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} h_i^{mn}(x, y, z), \quad i=1,2,3.. \quad (2.84)$$

2.5.3. Моделювання процесів зміни рівня ґрунтових вод у 2d постановці

Для моделювання зміни РГВ було розглянуто рівняння фільтраційного тиску у випадку плоскої фільтрації

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \gamma^2 \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$$

що може бути основою для створення математичної моделі для опису змін РГВ, яка може враховувати чинники штучних покривів та евапотранспірації.

У роботі пропонується шукати невідому функцію $h(x, y)$ у вигляді суми двох доданків

$$h(x, y) = h_1(x, y) + h_2(x, y).$$

Там для кожної функції $h_i(x, y)$, $i=1,2$ відповідає власна крайова задача, причому в кожному з цих питань наявні однорідні крайові умови, що дає змогу будувати системи незалежних базисних функцій.

Розв'язок цієї двовимірної задачі отримується подібно до попередньої тривимірної задачі.

2.6. Дослідження гідрогеодинамічних ефектів землетрусів

Рівномірні спостереження у свердловинах є одним із способів геофізичного моніторингу, спрямованого на пошук провісників землетрусів. Це з високою чутливістю варіацій рівня води до сейсмотектоническим змін напружено-деформованого стану середовища, що супроводжуються деформаціями водонасичених порід, розвитком у яких тріщинної дилатансії, змінами порового тиску. Разом з тим, виділення сейсмотектонічних сигналів із варіацій рівня води є непростим завданням. Об'єктивними причинами цього є невизначеність частотного діапазону та амплітуд змін напружено-деформованого стану середовища на стадіях підготовки землетрусів, а також різноманіття умов формування гідрогеодинамічного режиму конкретних спостережних свердловин.

Найбільш сприятливі умови для виявлення сейсмотектонічної деформації за рівномірними даними є при розтині свердловинами резервуарів напірних підземних вод, ізольованих слабопроникними товщами від впливу ґрунтових горизонтів, що лежать вище. У таких випадках варіації тиску в області живлення слабо і в згладженому вигляді впливає на величину гідростатичного напору в свердловині, тому може спостерігатися недренований статично ізольований відгук рівня води на земні припливи, атмосферного варіації тиску і сейсмотектонічну деформацію в широкому частотному діапазоні. Умовами ефективного моніторингу ПДВ за рівномірними даними також є: 1 – застосування технічних засобів синхронної реєстрації варіацій рівня води та атмосферного тиску з інтервалом дискретизації не менше ніж 10-15 хвилин; 2 – оцінка та компенсація впливу на варіації рівня води природних факторів-перешкод – атмосферного тиску, земних та морських припливів, опадів, водного харчування та техногенного впливу; 3 – оцінка деформометричних властивостей спостережних систем свердловина-резервуар з визначенням частотного діапазону прояву неспотвореного статично ізольованого відгуку та величини деформометричної чутливості варіацій рівня води.

Оцінка діапазону періодів, у якому проявляється статично ізольований відгук рівня води, проводиться за частотною його барометричного відгуку.

Варіації атмосферного тиску розглядаються як сигнал, що викликає зміну навантаження на дзеркало води в свердловині та зміну вертикальної компоненти напруги у відкритому резервуарі в діапазоні періодів від десятків хвилин до десятків діб. За поведінкою амплітудно-

частотної передавальної функції від варіацій атмосферного тиску до змін рівня води, а саме за наявності інтервалу частот або періодів, в якому амплітудно-частотна передатна функція максимальна та постійна, виділяється діапазон, який не спотворюється гідрогеодинамічних факторів-перешкод. Такий відгук рівня води в свердловині називається недренованим, тобто відповідним умовам відсутності перебігу води в резервуарі, і статично ізольованим, тобто не схильним до впливу процесів формування напору в розкритому природному резервуарі.

Доведено, що ступінь, з яким рівень води в свердловині реагує на землетрус, визначається не лише характеристиками свердловини та розкритого резервуара, а й значною мірою залежить від виду та періоду сейсмічної хвилі.

Проходження низькочастотних поверхневих хвиль від сильних віддалених землетрусів з періодами не менше 40 с викликають вимушені коливання рівня води в свердловині за рахунок посилення варіацій порового тиску в системі свердловина-резервуар. Цьому сприяє також різке підвищення проникності водонасичених порід під час вступу поверхневих хвиль та короткочасне збільшення водопровідності природного резервуара.

В роботі¹⁴² досліджувався вплив катастрофічних турецьких землетрусів 6 лютого 2023 р. на гідрогеодинамічне поле на території Кривбасу.

Результати гідрогеодеформаційного моніторингу, який проводиться з 2007 року Дніпропетровською геофізичною експедицією "Дніпрогеофізика" в розвідувальній свердловині глибиною 815 м, з відносним статичним рівнем в ній води –106 м від денної поверхні, свідчать про наявність загальних трендів у зниженні або підвищенні рівня води. На графіку показано коливання рівня підземної води в моніторинговій свердловині з листопада 2022 р. по лютий 2023 р. з інтервалом одне спостереження на добу (Рисунок 2.11).

¹⁴² Kendzera O. V., Mykulyak S. V., Semenova Yu. V., Skurativska I. A., Skurativskyi S. I. Assessment of seismic response of a soil layer with the oscillating inclusions. *Geophysical journal*. 2020. Vol. 42 (4). P. 47–58 [3]; Kendzera O. V., Mykulyak S. V., Semenova Yu. V., Skurativska I. A., Skurativskyi S. I. Seismic response of a layered soil deposit with inclusions. *Geophysical journal*. 2021. Vol. 43 (2). P. 3–13 [4].

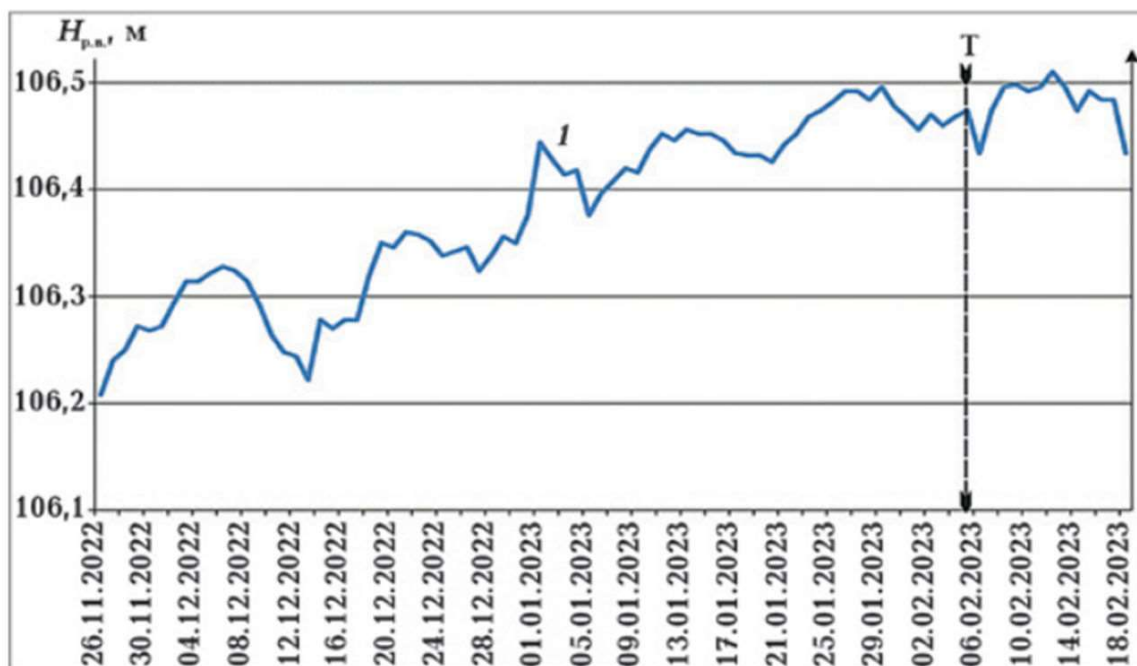


Рисунок 2.11 – Графік коливання рівня підземної води в глибокий моніторинговій свердловині з листопада 2022 р. по лютий 2023 р. (дискрет 24 год, відлік о 12 год (UTC)): 1 – рівень підземних вод в свердловині; Т – початок турецьких землетрусів

Коливання підземних вод пов'язані не лише з повільними неотектонічними рухами, але й з більш швидкими геодинамічними процесами в зоні розлому. Ці процеси можуть бути провісниками землетрусів, а їх розшифровка може допомогти в прогнозуванні цих явищ¹⁴³.

¹⁴³ Nahornyi V., Pigulevskiy P., Svystun V., Shumlianska L. To the question of verification of forecasting methods of earthquakes. *Extended Abstracts of XIV Int. Sci. Conf. «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment»*. (10–13 November 2020, Kyiv). 2020. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056080> [11]; Nahornyi V. V., Shevchenko A. V., Lyashchuk V. I., et al. Hydrogeodeformation monitoring as a tool for earthquake prediction in the Dnieper-Krivoy Rog aulacogen. *Journal of Geodynamics*. 2020. Vol. 136. P. 101718 [159]; Венгерський П. С. Чисельне моделювання руху поверхневих і ґрунтових потоків та їх взаємодія на території водозбору : автореф. дис. ... д-ра фіз.-мат. наук : 01.05.02. Львів, 2017 [160]; Li Y., Zhang G., Wang H., et al. Monitoring of groundwater level changes and its relationship with tectonic activities in the North China Plain. *Engineering Geology*. 2023. Vol. 282. P. 106135 [161].

Зміна геологічного середовища внаслідок техногенного навантаження робить зону Криворізько-Кременчуцького розлому більш чутливою до "швидких" неотектонічних процесів. Це може призвести до землетрусів, зсувів ґрунту та інших небезпечних явищ. Моніторинг геодинамічних процесів у тектонічних зонах за допомогою моніторингових свердловин може дати цінну інформацію про сейсмічну активність. Цей метод дозволяє:

- **Виявити пружно-деформаційні зміни**, що виникають внаслідок потужних віддалених землетрусів.

- **Зафіксувати аномальні зміни**, які передують сильним сейсмічним подіям.

- **Оцінити величину впливу сейсמודинаміки**, яка може варіюватися залежно від віддаленості та потужності землетрусу.

- **Відстежувати локальні зміни геодинамічних процесів**, що відбуваються після потужних землетрусів.

За зміни дискрету моніторингових спостережень (6 хв) у зазначеній свердловині (815 м) було зафіксовано реакцію підземної гідросфери на деформаційні процеси в літосфері Землі після турецьких землетрусів 6 лютого 2023 р., першого – о 01 год 17 хв, 36,1 с з магнітудою 7,8 та другого – о 10 год 24 хв 49,6 с з магнітудою 7,5 (Рисунок 2.12).

Результати аналізу отриманих даних засвідчують, що підземна гідросфера земної кори території Кривбасу дуже динамічна й чутлива не тільки до локальних змін, а й потужних зовнішніх тектонічних полів, які утворюють гідрогеодинамічну систему (гідрогеодеформаційне поле). Це дає змогу реєструвати її збурення на значній відстані від місця виникнення. Важливою властивістю згаданого поля є його реакція на зміни напруженого стану земної кори та верхньої мантії, що обумовлюється процесами розущільнення порід унаслідок геодинамічних зрушень у зонах розломів (Західний, Тарапаківський, Саксаганський, Східний та у дрібніших порушеннях), з подальшою зміною їх водонасиченості.

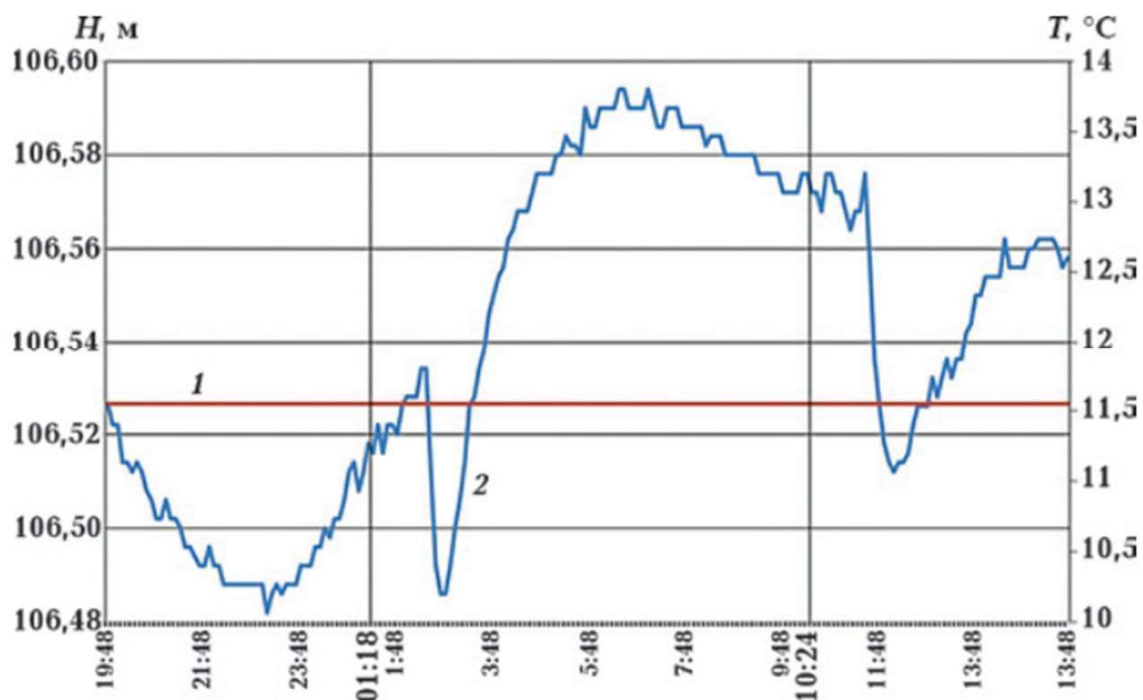


Рисунок 2.12 – Графік коливання рівня підземної води під час турецьких землетрусів 06 лютого 2023 р. (дискрет 6 хв): 1 – рівень підземних вод, м; 2 – температура підземних вод, °C

Моніторингові спостереження за рівнем води у розвідувальній свердловині зафіксували локальні зміни в геодинамічних (гідрогеодеформаційних) процесах, які відбулися після потужних турецьких землетрусів 6 лютого 2023 р. о 01 год 17 хв 36,1 с з магнітудою 7,8 та о 10 год 24 хв 49,6 с з магнітудою 7,5. У літосфері на відстані ≈ 1300 км від епіцентрів землетрусів відбулися процеси у вигляді розуцільнення (розтягання) порід у зонах Західного, Тарапаківського, Саксаганського, Східного розломів та у дрібніших порушеннях.

Розривно-тріщинні підземні води території Кривбасу відреагували на ці події через 1 год 6 (12) хв у вигляді пониження їх рівня на 2-3 см¹⁴⁴.

¹⁴⁴ Nahorny V., Pigulevskiy P., Svystun V., Shumlianska L. To the question of verification of forecasting methods of earthquakes. Extended *Abstracts of XIV Int. Sci. Conf. «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment»*. (10–13 November 2020, Kyiv). 2020. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056080> [11].

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МЕТОДУ ЗБЕРІГАННЯ РІДИНИ В РЕЗЕРВУАРАХ РІЗНОЇ ФОРМИ ПРИ СЕЙСМІЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

Аварії резервуарів різної форми, викликані сейсмічними впливами

Землетруси в усьому світі вплинули на резервуари зберігання рідких вуглеводнів¹⁴⁵, що призвело до економічних втрат через втрату

¹⁴⁵ Шугайло О-р П., Рижов Д. І. Загальні принципи оцінки сейсмічної міцності сталевих опорних конструкцій обладнання і трубопроводів атомних станцій відповідно до нормативних вимог. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2021. № 4(92). С. 4-11. URL: [https://doi.org/10.32918/nrs.2021.4\(92\).01](https://doi.org/10.32918/nrs.2021.4(92).01) [280]; Шугайло О-р П., Білик С. І. Вплив зміни технологічних умов експлуатації сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблоків атомних станцій на їх сейсмічну міцність. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2022. № 1(93). С. 62–70. URL: [https://doi.org/10.32918/nrs.2021.1\(93\).07](https://doi.org/10.32918/nrs.2021.1(93).07) [281]; Гарбуз С. В., Халмурадов Б. Д. Розрахунок можливих екологічно шкідливих викидів в атмосферу із резервуарів з залишками нафтопродуктів. Матеріали XIII міжнародної науково-технічної конференції «Авіа-2017». Національний авіаційний університет м. Київ. 2017. С. 787–793 [282]; Пузік С. О., Островський Б. О., Комар Д. А. Методика розрахунку процесу примусової вентиляції резервуарів від залишків рідких 157 нафтопродуктів. *Вісник Національного авіаційного університету*. 2013. № 2. С. 109–113 [283]; Гарбуз С. В., Ликов О. М. Дослідження техногенної та екологічної безпеки процесу рекуперації нафтопродуктів. Тези доповідей VII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист». (Черкаси, 20-21 жовт. 2017 р.). 2017. С. 149–151 [284]; Гавадзин Н. О. Природно-техногенні процеси та економічні збитки від шкідливих впливів нафтогазових підприємств на навколишнє середовище. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2010. № 1. С. 125–130 [285]; Максимюк М. Р., Міцкевич Д. І., Міцкевич А. І. Нафтове забруднення поверхневих вод та шляхи подолання його наслідків. Наукові праці Чорноморського державного університету імені Петра Могили комплексу «Києво-Могилянська академія». Сер.: Техногенна безпека. 2014. Т.233, Вип. 221. С. 37–40 [286]; Курганський В. М., Тішаєв І. В. До питання забруднення оточуючого середовища в процесі буріння нафтових та газових

вмісту та вартості відновлення/заміни конструкції, а також екологічної небезпеки через розлив рідини. Найпоширенішими типами пошкоджень, які спостерігаються в резервуарах, є: пошкодження даху, викликане коливанням рідини поблизу даху, пошкодження з'єднань трубопроводів, пошкодження стінок резервуару, як правило, у вигляді викривлення, викликаного високими напругами стиску в резервуарах. стінок резервуара, а також пошкодження з'єднання стінки з основою, спричинене підйомом резервуара¹⁴⁶. У деяких випадках також

свердловин. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. 2006. № 38. С. 7–9 [287]; Іванюта С. Моніторинг та оцінювання екологічних ризиків техногенного походження. Аналітична доповідь Київ : Вид-во НІСД, 2012. 52 с. [288]; Рудько Г. І., Адаменко Я. О., Пилипенко А. А. та ін.. Оцінка впливів на навколишнє середовище (ОВНС) при експлуатації Новосхідницького нафтового родовища. Геоекоекологічні проблеми Івано-Франківщини та Карпатського регіону: зб. наук. праць. Івано-Франківськ: ЕКОР. 1998. С. 149–196 [289]; Крайнюков О. М. Особливості розповсюдження вуглеводневого забруднення та оцінка його впливу на геоекоекологічний стан басейну р. Сіверський Донець у межах Харківської області : автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 11.00.11 «Конструктивна географія і раціональне використання природних ресурсів». Харків, 2007. 20 с. [290].

¹⁴⁶ Гарбуз С. В., Халмурадов Б. Д. Розрахунок можливих екологічно шкідливих викидів в атмосферу із резервуарів з залишками нафтопродуктів. Матеріали XIII міжнародної науково-технічної конференції «Авіа-2017». Національний авіаційний університет м. Київ. 2017. С. 787–793 [282]; Пузік С. О., Островський Б. О., Комар Д. А. Методика розрахунку процесу примусової вентиляції резервуарів від залишків рідких 157 нафтопродуктів. *Вісник Національного авіаційного університету*. 2013. № 2. С. 109–113 [283]; Гарбуз С. В., Ликов О. М. Дослідження техногенної та екологічної безпеки процесу рекуперації нафтопродуктів. Тези доповідей VII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист». (Черкаси, 20-21 жовт. 2017 р.). 2017. С. 149–151 [284]; Гавадзин Н. О. Природно-техногенні процеси та економічні збитки від шкідливих впливів нафтогазових підприємств на навколишнє середовище. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2010. № 1. С. 125–130 [285]; Максимюк М. Р., Міцкевич Д. І., Міцкевич А. І. Нафтове забруднення поверхневих вод та шляхи подолання його наслідків. Наукові праці Чорноморського державного університету імені Петра Могили комплексу «Києво-Могилянська академія». Сер.: Техногенна безпека. 2014. Т.233, Вип. 221. С. 37–40 [286]; Курганський В. М., Тішаєв І. В. До питання забруднення оточуючого середовища в процесі буріння нафтових та газових свердловин. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. 2006. №

спостерігалася пожежа та повний обвал. Крім того, резервуари можуть перекинутися через неналежне кріплення.

Таблиця 3.1

Світова статистика аварій резервуарів, які відбулися під час землетрусів значної інтенсивності¹⁴⁷

№ п/п	Дата	Місце події	MW	Аварії резервуарів
1	10.03 1933 р.	м. Лонг Бич, Каліфорнія, США	6,4	Повністю зруйновано 1 водяний резервуар, 16 нафтових і водяних

38. С. 7–9 [287]; Іванюта С. Моніторинг та оцінювання екологічних ризиків техногенного походження. Аналітична доповідь Київ : Вид-во НІСД, 2012. 52 с. [288]; Рудько Г. І., Адаменко Я. О., Пилипенко А. А. та ін.. Оцінка впливів на навколишнє середовище (ОВНС) при експлуатації Новосхідницького нафтового родовища. Геооекологічні проблеми Івано-Франківщини та Карпатського регіону: зб. наук. праць. Івано-Франківськ: ЕКОР. 1998. С. 149–196 [289]; Крайнюков О. М. Особливості розповсюдження вуглеводневого забруднення та оцінка його впливу на геооекологічний стан басейну р. Сіверський Донець у межах Харківської області : автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 11.00.11 «Конструктивна географія і раціональне використання природних ресурсів». Харків, 2007. 20 с. [290]; Іванюта С. Моніторинг та оцінювання екологічних ризиків техногенного походження. Аналітична доповідь Київ : Вид-во НІСД, 2012. 52 с.; Іщук Ю. Л., Кобилянський Є. В., Кочірко Б. Ф. Біорозщеплюваність нафтопродуктів і проблеми біосфери. *Нафтова і газова промисловість*. 2004. № 1. С. 57–60 ; Гринюк В. І. Міграція нафтопродуктів в зоні впливу нафтогазовидобувних підприємств. Сучасний стан та якість навколишнього середовища окремих регіонів: зб. наук.праць Міжнародної наукової конференції молодих вчених. (Одеса, 1–3 червня 2016 р.). 2016. С. 85–88 [291]; Гринюк В. І. Техногенне навантаження нафтогазовидобувних підприємств на водне середовище. XVI Всеукраїнська наук.-техн. конф. (Одеса, 14 квітня 2016 р.). 2016. С. 22–24 [292].

¹⁴⁷ Онищенко В. О., Винников Ю. Л., Зоценко М. Л., Харченко М. О., Ларцева І. І., Бредун В. І., Нестеренко Т. М. Ефективні конструктивно-технологічні рішення об'єктів зберігання нафти і нафтопродуктів у складних інженерно-геологічних умовах : монографія. Полтава : ФОП Пусан А. Ф. 2019. 233 с. [7]; D'Amico M. Seismic fragility and dynamic behavior of atmospheric cylindrical steel tanks. [Dissertation thesis]. Alma Mater Studiorum Università di Bologna. Dottorato di ricerca in Ingegneria civile, chimica, ambientale e dei materiali, 30 Ciclo. 2018. URL: <https://doi.org/10.6092/unibo/amsdottorato/8660> [28].

				резервуарів зазнали перелив продукту та пошкодження.
2	21.07 1952р.	Округ Керн, Каліфорнія, США	7,5	Серйозні пошкодження сталися на заводі з виробництва бензину Палома через поломку двох сфер для зберігання бутану, які зіскали зі своїх опор і зламали системи трубопроводів. Бутан, що витік, загорівся і знищив усе приміщення.
3	22.05 1960 р.	Чилі (Великий чилійський землетрус)	9,5	Пошкоджено декілька нафтових і велика кількість водонапірних резервуарів.
4	27.03 1964 р.	Аляска, США (південне узбережжя)	9,3	Через цунамі отримали значні ушкодження 7 нафтових резервуарів з плаваючим дахом, 1 водяний резервуар повністю зруйнований, 10 резервуарів отримали пошкодження стінки, покрівлі та анкерів.
5	16.06 1964 р.	м. Ніїгата, Японія, (узбережжя Японського моря)	7,5	На 5 нафтових РВС і 2 резервуарах скрапленого газу відбулася пожежа. Цунамі підтопило узбережжя та сприяло поширенню плями палаючої продукції, що призвело до підпалу сусідніх 149 РВС.
6	09.02 1971 р.	Долина Сан-Фернандо, Каліфорнія, США	6,6	6 водяних резервуарів отримали пошкодження стінок, покрівлі чи анкеру, 1 резервуар повністю зруйновано, 8 резервуарів з плаваючим дахом зазнали перелив продукту та

				пошкодження. Основними виявленими пошкодженнями були розриви плити підлоги, розтин снаряда, пошкодження ущільнень даху у випадку резервуарів з плаваючим дахом та пошкодження вхідних/вихідних фітінгів.
7	23.12 1972 р.	м. Манагуа, Нікарагуа	6,3	Резервуари для зберігання зерна INCEI показали підняття своїх анкерних болтів на південь і місцеве викривлення резервуарів на північ, а також у верхній частині. Три танки зазнали викривлення, але їх залишили працювати.
8	12.06 1978 р.	Префектура Міягі, Японія	7,4	3 РВС з сирою нафтою отримали тріщини, пошкоджені анкери водяного резервуару. На нафтопереробному заводі Tohoku Oil Sendai, що в передмісті міста Сендай, три резервуари для зберігання нафти були серйозно пошкоджені, що призвело до витоку вмісту. Три резервуари вийшли з ладу на кільцевій нижній пластині вздовж внутрішнього кутового зварного шва в кутовому з'єднанні з пластиною корпусу. Вимірювання товщини кільцевої донної пластини після землетрусу виявили, що товщина донної

				пластини в цих резервуарах зменшилася внаслідок корозії. Дві ємності осіли в середньому приблизно на 10-14 см по периметру. Пошкоджені анкери водяного резервуару. Анкерні болти бака для води були рівномірно витягнуті приблизно на 15 см. У багатьох інших резервуарах рухома драбина на плаваючому даху була погнута або деформована.
9	15.10 1979 р.	Імперська долина, Каліфорнія, США	6,4	Повні резервуари на електростанції Імперського зрошувального району (IID) зазнали пошкодження даху, яке полягало в тому, що дах відокремився від корпусу в місці зварювання даху/оболонки, що призвело до витоку нафти. Серйозне пошкодження на терміналі Southern Pacific Pipe Lines (SPPL) було завдано трьом резервуарам, головним чином через викривлення «слонячої ноги». 18 резервуарів на цьому терміналі отримали значні пошкодження.
10	26.01 1980 р.	Грінвілль, Каліфорнія, США	5,8	Землетрус вразив переважно винні резервуари. Деформації резервуарів у вигляді «слонячої ноги», ромбоподібні деформації.

11	2.05 1983 р.	м. Коалінга, Каліфорнія, США	6,2	Землетрус дав можливість спостерігати за роботою резервуарів великого та середнього розміру під час сильного руху ґрунту на відносно невеликій відстані від епіцентру. Численні ушкодження РВС. Для резервуарів з плаваючим дахом критичними стали довгоперіодичні коливання, які призвели до підтоплення плаваючого даху та розливу нафти. Порожні та напівпорожні резервуари не отримали ніяких ушкоджень. Менші резервуари з болтами з нижчим співвідношенням D/H виявилися вразливими до пошкодження та можливого виходу з ладу, а великі резервуари менш вразливі до викривлення ніж, ніж менші резервуари.
12	22.05 1983 р.	Острів Хонсю, Японія	7,9	Велика кількість нафтових резервуарів з плаваючим дахом (на одному з яких виникла пожежа) отримали ушкодження.
13	03.03 1985 р.	Чилі	8,0	Великий нафтопереробний завод у Конконі, був пошкоджений землетрусом. Один сталевий резервуар значно нахилився, а інший, зігнутий у верхній частині та забруднений розливом нафти. Інші пошкоджені об'єкти були виявлені на

				хімічному заводі Oxiqum, резервуарному парку Terquim і порту Сан-Антоніо.
14	07.05 1986 р.	о. Адак, Алеутські острови	8,0	Резервуари для зберігання, розташовані на ділянці паливної пристані та електростанції 3 і мають тертковий резервуар 1 із співвідношенням сторін H/D, не зазнали пошкоджень.
15	02.03 1987 р.	затока Пленті, Нова Зеландія	6,5	Значно постраждали промислові об'єкти. На заводі Bay Milk Products в Еджкамбе обрушилися величезні молочні силоси з нержавіючої сталі, виливши тисячі літрів молока. Дві молоковози перекинуло на боки. На Н.З. Лікєро-горілкової компанії, резервуари зі спиртними напоями впали, наситивши землю горілкою та джином.
16	17.10 1989 р.	Північна Каліфорнія, США (землетрус Лома-Прієта)	7,1	Утворення тріщин в РВС, руйнування допоміжного обладнання внаслідок відриву, у 2 РВС машинного мастила ушкоджено стінки, 2 РВС нафтопродуктів зазнали деформацій відриву.
17	22.04 1991 р.	Коста-Ріка	7,7	Нафтопереробний завод RECOPE в Мойні зазнав серйозних пошкоджень заводських приміщень і резервуарів для зберігання нафти. Бак № 792, який був тимчасовим резервуаром для зберігання нафти та дизельного палива, вибухнув і

				впав приблизно за 50 метрів від свого початкового місця. Резервуари 704, 705 і 728 зазнали серйозних пошкоджень даху та верхніх частин стінок через плескання вмісту. Сили, спричинені гідродинамічними ефектами, спричинили розрив з'єднання сталевих пластин у місці з'єднання даху та стіни. П'ять цистерн з бензином або повністю зруйнувалися, або сильно перекинулися їхні плаваючі дахи. Чотири резервуари зазнали повної втрати вмісту через класичну «слонову ногу» викривлення вертикальних стінок біля основи.
18	28.06 1992 р.	Ландерс	7,3	Хоча жоден резервуар для зберігання нафти не був пошкоджений під час цього землетрусу, велика кількість резервуарів для води в постраждалих зоні та невелика кількість пошкоджень, за винятком двох повних несправностей, роблять це значний землетрус для танків. У Ландерсі більшість резервуарів для води працюють майже на повну, встановлення на схилі може забезпечити «покращені» умови фундаменту. Більшість резервуарів у районі

				Ландерса були низькими, з висотою менше 7,4 м. У районі Лос-Анджелеса, за 180 км від Ландерса, сталося розбризкування та пошкодження ущільнення великих масляних резервуарів з плаваючим дахом.
19	17.01 1994 р.	Нортрідж, Сан-Франциско, США	6,7	Пошкоджено танки, розташовані на північ (20 км) і захід (15 км) від епіцентру. Танки Larwin були повністю знищені. Пошкодження даху резервуарів для води, викривлення «слоняча нога», в інших резервуарах пошкоджена верхня частина корпусу та витягнуті анкерні болти. У міста Сімі виникли проблеми з закопаними та засипаними дренажами, що витягувалися з дна резервуару.
20	17.01 1995 р.	Кобе, Японія	7,3	Резервуарні парки, розташовані на меліорованих землях уздовж набережної зазнали значних ушкоджень. Багато резервуарів зазнали надмірних осідань або поломок підшипників. Втрат продукту з пошкоджених резервуарів не було.
21	17.08 1999 р.	Коджаелі, Туреччина	7,6	Землетрус викликав катастрофічну пожежу на нафтопереробному заводі Тупрас. Пошкоджено біля сотні нафтових РВС. На

				резервуарах з плаваючим дахом сталася пожежа та розлив сирої нафти. Пожежа почалася на шести циліндричних резервуарах для нафти з плаваючим дахом і була повністю ліквідована через чотири дні після землетрусу. Крім того, на заводі з виробництва акрилового волокна AKSA землетрус пошкодив три резервуари для зберігання та спричинив викид 6400 тонн ацетонітрилу, який є легкозаймистим, токсичним та канцерогенним, у повітря, море та підземні води.
22	21.09 1999 р.	Район Цзіцзі, Тайвань	7,7	Кілька РВС з плаваючим дахом отримали ушкодження стінок і руйнування місць з'єднання стінок з днищем.
23	26.09 2003 р.	Острів Хоккайдо, Японія	8,3	Значні ушкодження 7 великих нафтових РВС з плаваючим дахом об'ємом 30 – 40 тис. м ³ , викликаними великими амплітудами поверхневих хвиль, які перевищували 3 метри. У двох випадках такі переміщення призвели до пожежі. Відбулося підтоплення плаваючого даху у 2 резервуарів об'ємом 110 тис. м ³ .
24	26.12 2003 р.	м. Бам, Іран	6,6	У трьох із шести сталевих масляних резервуарів компанії Roghan Jonub Company стався витік рідини

				через коливання рідини під час землетрусу. У цих резервуарах не спостерігалось інших видів пошкоджень, таких як викривлення «слонячої ноги», розриву жорстких трубопроводів і цистерни.
25	26.12 2004 р.	Провінція Ачех, о. Суматра, (узбережжя Індійського океану)	9,1	Пошкодження резервуарів для зберігання нафти, деякі з них були повністю зруйновані та розкидані на значні відстані.
26	15.08 2007 р.	Перу	8,0	У порту Сан-Мартін резервуар для зберігання води не постраждав. У компанії Blue Pacific Oil, великому заводі з переробки та зберігання риб'ячого жиру на узбережжі є 10 великих сталевих резервуарів діаметром близько 12 м і висотою 10 м, з'єднаних трубами. Вони були побудовані в 1967 році. Повідомляється, що шість танків стояли на залізобетонному плоту глибиною 1,5 метра. Три резервуари зазнали деформації «слоняча нога» - вигинулися по периметру. Один резервуар показав викривлення на першому рівні нахилу, 1,5 м над землею. Жоден продукт не був втрачений через поломку труби чи резервуара, але деякі виплеснулися вгору

				через оглядові отвори. Не було жодних ознак бокового руху чи будь-яких обмежень, які б запобігли цьому, але є ймовірність того, що було осідання. На Eresca Peru, ще одному заводу риб'ячого жиру, що знаходиться поруч із Austral і має подібні потужності, пошкоджень не було. Складське депо біля Піско приймає нафто- та газопроводи з морських платформ і зберігає їх. Ємність для води викривилася та розкололася внизу, але жоден продукт не був втрачений. Всі інші резервуари були неущкоджені.
27	27.02 2010 р.	Чилі	8,8	Не спостерігалось жодної серйозної відмови в резервуарах. В аеропорту Сантьяго знаходилося чотири сталеві паливні баки та один для зберігання питної води, усі вони були зварні. Резервуар з водою розвалився, а чотири сусідні резервуари з рідким паливом залишилися цілими.
28	04. 09 2010 р.	Дарфілд, Нова Зеландія	7,1	1) 86 % бетонних резервуарів, не мали помітних пошкоджень, які можна було б віднести до землетрусу. Лише два резервуари отримали серйозні пошкодження,

				обидва розташовані на алювіальній рівнині на західній стороні Крайстчерча, і обидва отримали пошкодження даху. Один із цих резервуарів отримав пошкодження на стику даху та стіни. 2) Усі перевірені сталеві резервуари були з'єднані сталевую конструкцією з ПВХ або подібного матеріалу. Резервуари були закріплені на бетонній фундаментній плиті за допомогою анкерних болтів. Було оглянуто шість резервуарів, чотири з яких вийшли з ладу на анкерних болтах. Чотири пошкоджені резервуари знаходяться в Папаруа. Непошкоджені резервуари розташовані в Ракаї, яка знаходиться на такій же відстані від епіцентру землетрусу, що й Папаруа. Резервуари Ракаї менші за ті, що знаходяться в Папаруа, але мають більшу кількість і більші анкерні болти, що пояснює, чому вони не вийшли з ладу. 3) Було перевірено чотири дерев'яні резервуари. Після землетрусу два резервуари протікали, а один залишався функціональним. Один – зруйнувався.

29	11.03 2011 р.	о. Хонсю, Японія	9,0	Пошкоджено велику кількість резервуарів, аварії більшості яких (до 80%) сталися внаслідок цунамі, що викликав землетрус і з інших причин. 50 аварійних випадків на об'єктах нафтогазової промисловості: 4 пожежі/вибухи, 6 витоків, 20 випадків ушкодження трубопроводів, 20 випадків ушкодження конструкцій резервуарів. Зафіксовано 52 випадків пошкодження резервуарів інших галузей промисловості.
30	20.05 2012 р.	область Емілія Романья, Італія	6,1	Численні ушкодження резервуарів зберігання рідких вуглеводнів. Найбільш типові пошкодження: руйнування анкерного кріплення до фундаментів, втрата стійкості форми типу «слоняча нога» (для широких резервуарів), втрата стійкості ромбоподібної форми внаслідок втрати стійкості колон, які їх підтримували (для високих резервуарів на опорах).
31	24.08 2014 р.	долина Напа, Американський каньйон, Каліфорнія	6,0	З 12 резервуарів у водопровідній системі міста Напа один (під назвою Montana «В») зазнав значної шкоди. Резервуар являє собою незакріплений круглий зварний сталевий резервуар діаметром 67 футів і висотою

				37 футів з дахом із гофрованого заліза (CGI), який підтримується балками з червоного дерева на сталевих колонах. Вода хлюпала з амплітудою приблизно 6 футів, пошкодивши дах. Стінки не викривлялися, але спостерігалось деяке хитання внаслідок руху в ковзному з'єднанні випуску. Резервуар спорожнів одразу після події через прорив труби поблизу. Приблизно 50 виноробень зазнали значної шкоди резервуарам, бочкам та/або будівлям. Ємності для вина з нержавіючої сталі, які використовуються у виноробній промисловості, як правило, не закріплені або закріплені неналежним чином. Пошкодження обмежені повними баками з обмеженим опорним кріпленням.
32	06.02 2023 р.	м. Газіантеп, Туреччина	7,8	У резервуарах для зберігання рідини було виявлено пошкодження стінок, спричинене імпульсними та конвективними ефектами рідини. Крім того, один із резервуарів нафтохранища перекинувся через неналежне кріплення. У збірних конструкціях також були визначені різні види пошкоджень.

Дійсно, для нафтових резервуарів зазвичай використовується сталь, натомість для резервуарів для вина часто використовуються алюміній і нержавіюча сталь. Основні типи покрівлі - плаваюча і стаціонарна; для останньої типології найпоширенішими формами є купол, конус, плоска форма та кулак. Однак були виявлені випадки фіксованого даху з внутрішнім плаваючим піддоном. Інформація про фундамент включає в себе інформацію про анкерну систему та тип конструкції фундаменту. Звіти показують, що найпоширенішими типами фундаментів, які використовуються для атмосферних резервуарів, є гравійна або бетонна підкладка, бетонне кільце, пряма основа на ущільненому ґрунті або камені, пальовий фундамент. Висота рідини під час землетрусу є вирішальним питанням для сейсмозвідки танка. Рівень заповнення масляного резервуару часто може бути меншим за 50 %, інакше баки розподільчої системи водопостачання підтримуються на рівні від 80 % до 100%.



Рисунок 3.1. м. Ніїгата, Японія, (узбережжя Японського моря), 1964 р.



Рисунок 3.2. Пошкодження на даху резервуара після надмірного виплескування вмісту рідини



Рисунок 3.3. Кобе, Японія, 1995 р.



Рисунок 3.4. Емілія Романья, Італія, 2012 р.



Рисунок 3.5. Пошкодження стіни через коливання рідини (справа), зсув фундаменту (зліва). Дарфілд, Нова Зеландія, 2010 р.



Рисунок 3.6. Призматичний бетонний резервуар, Дарфілд, Нова Зеландія, 2010 р.

Інформація, зібрана по сейсмічним подіям (32 події), що відбулися по всьому світу за період з 1933 по 2023 рр. (90 років) та впливали на стан екологічної безпеки процесу зберігання рідких вуглеводнів, має на меті представити адекватний опис загального стану та відгуку резервуару в момент виникнення землетрусу.

Зокрема:

- Інформація про місце розташування резервуару, тип ґрунту;
- Інформація про резервуари, тобто розміри, форма, об'єм, тип фундаменту, наявність анкерного кріплення, тип даху, тип з'єднання корпусу та матеріал корпусу, рівень рідини під час землетрусу, а також остаточні пошкодження та ступінь техногенного впливу на довкілля¹⁴⁸.

¹⁴⁸ Онищенко В. О., Винников Ю. Л., Зоценко М. Л., Харченко М. О., Ларцева І. І., Бредун В. І., Нестеренко Т. М. Ефективні конструктивно-технологічні рішення об'єктів зберігання нафти і нафтопродуктів у складних інженерно-геологічних умовах : монографія. Полтава : ФОП Пусан А. Ф. 2019. 233 с. [7]; D'Amico M. Seismic fragility and dynamic behavior of atmospheric cylindrical steel tanks. [Dissertation thesis]. Alma Mater Studiorum Università di Bologna. Dottorato di ricerca in Ingegneria civile, chimica, ambientale e dei materiali,

30 Ciclo. 2018. URL: <https://doi.org/10.6092/unibo/amsdottorato/8660> [28]; Sesetyan, K., Stucchi, M., Castelli, V., Gomez Capera, A. A. Kahramanmaras Gaziantep Türkiye M7.7 Earthquake, 6 February 2023 (04:17 GMT+03:00). Large historical earthquakes of the earthquake-affected region: a preliminary report. INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Italy. 2023. URL: <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/en/> [250]; Адаменко О. М., Адаменко Я. О., Яцишин Т. М. та ін. Екологічна безпека нафтогазового комплексу у західному регіоні. Колективна монографія за ред. проф. Я. О. Адаменка. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2017 [251]; Артемчук В. О., Попов О. О., Яцишин А. В., Кириленко Ю. О., Яцишин Т. М. Перспективи розробки математичних та програмних засобів перевірки екологічної ефективності прийняття управлінських рішень. Моделювання та інформаційні технології: зб. наук. пр. Ін-ту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. 2018. Вип. 85. С. 75–80 [252]; Шугайло О-р П., Рижов Д. І. Загальні принципи оцінки сейсмічної міцності сталевих опорних конструкцій обладнання і трубопроводів атомних станцій відповідно до нормативних вимог. Ядерна та радіаційна безпека. 2021. № 4(92). С. 4-11. URL: [https://doi.org/10.32918/nrs.2021.4\(92\).01](https://doi.org/10.32918/nrs.2021.4(92).01) [280]; Шугайло О-р П., Білик С. І. Вплив зміни технологічних умов експлуатації сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблоків атомних станцій на їх сейсмічну міцність. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2022. № 1(93). С. 62–70. URL: [https://doi.org/10.32918/nrs.2021.1\(93\).07](https://doi.org/10.32918/nrs.2021.1(93).07) [282]; Гарбуз С. В., Халмурадов Б. Д. Розрахунок можливих екологічно шкідливих викидів в атмосферу із резервуарів з залишками нафтопродуктів. Матеріали XIII міжнародної науково-технічної конференції «Авіа-2017». Національний авіаційний університет м. Київ. 2017. С. 787–793 [283]; Пузік С. О., Островський Б. О., Комар Д. А. Методика розрахунку процесу примусової вентиляції резервуарів від залишків рідких 157 нафтопродуктів. *Вісник Національного авіаційного університету*. 2013. № 2. С. 109–113 [283]; Тимченко І. В. Дослідження моделей розповсюдження нафтових забруднень в умовах обмежених акваторій. *Електронний вісник НУК*. 2010. № 1 [294]; Ковач В. О. Аналіз надзвичайних ситуацій, пов'язаних із розливами нафти внаслідок аварій танкерів та інших суден. Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ ім. Г.Є. Пухова НАН України. 2016. Вип. 77. С. 73–82 [295]; Ковач В. О. Розробка математичних засобів для оцінки рівня забруднення поверхні моря в результаті розливу нафти: матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (Черкаси, 19–20 травня 2016 р.). Черкаси : ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2016. С. 63–65 [296]; Харламова О. В. Науково-методологічні основи управління екологічною безпекою в умовах природно-антропогенного навантаження : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 21.06.01. Суми, 2018. 38 с. [297]; Челядин Л. І., Григорчук Л. І., Челядин В. Л., Богославець М. М. Методи та устаткування зменшення забруднення водних ресурсів стоками з

3.2. Основні несправності резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях

Звіти про пошкодження, спричинені минулими землетрусами, показують, що резервуари для зберігання рідин демонструють складну динамічну поведінку під сейсмічним впливом. Виникнення певних несправностей, залежить від таких факторів, як наявність анкерів, коефіцієнт струнності, тип даху, швидкість заповнення тощо. Досвід показує, що на основі співвідношення H/D динамічна поведінка резервуара може повністю змінитися. Зазвичай під сейсмічним впливом тонкий резервуар поводить себе як консоль, з концентрацією високих напруг біля основи та значним значенням моменту перекидання через високе положення центру маси. Найбільш вірогідними поломками є підйом і викривлення ступні, розрив стику між днищем і нижньою оболонкою, викривлення нижньої оболонки, поломка системи вхідного/вихідного трубопроводу, зрив анкерів, викривлення оболонки в центральній частині оболонки. Пошкодження верхньої частини і даху не характерні для високих резервуарів. Навпаки, дуже приземкуваті резервуари зазнають більшого пошкодження верхньої частини через коливання вмісту всередині, зокрема викривлення у верхній частині корпусу та на даху, руйнування з'єднання стіни та даху, руйнування крокв і колони, що підтримують дах.

Технічний опис вищезазначених сейсмічних пошкоджень:

- **Режими викривлення оболонки.** Корпус резервуара може піддаватися різного роду нестійкості: еластичні та пружно-пластичні. Перший, який зазвичай стосується центральної частини оболонки, широко відомий як «алмазне прогинання» через деформовану конфігурацію та включає пружні властивості матеріалу оболонки. Це викликано надмірною меридіональною напругою вертикального стиснення в поєднанні з помірними кільцевими напругами розтягу (цей

об'єктів нафтогазового комплексу. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2013. № 2(47). С. 145–151 [298]; Бондарець Ю. В., Матвєєва О. Л. Аналіз технологій ліквідації нафторозливів із застосуванням сорбентів на основі торфового моху роду *Sphagnum*. *Проблеми екологічної біотехнології*. 2013. № 1. URL: <http://jrn1.nau.edu.ua/index.php/ecobiotech/article/view/4732> [299]; Назаренко С. К., Архипова Л. М. Сучасні методи ліквідації аварійних розливів нафти на водних об'єктах суходолу. *Науковий вісник ІваноФранківського національного технічного університету нафти і газу*. 2016. № 1. С. 72–79 [300] та ін.

стан виникає над нижньою частиною резервуара, де гідродинамічний тиск, що призводить до збільшення пружного навантаження на вигин, невеликий порівняно з його величина на базі танка). Навпаки, пружно-пластичне прогинання, також відоме як «прогинання стопи слона», поширюється навколо окружності резервуара близько до нижнього ряду, і воно є результатом спільної дії вертикальних стискаючих напруг, що перевищують критичне напруження, і кільцевого натягу, близького до межі текучості. Утворення опуклості може бути трьома компонентами, третім є локальні напруги згину через обмеження в основі бака. Режимми викривлення оболонки можуть мати різні наступні сценарії, такі як руйнування зварного шва між сусідніми пластинами стіни, руйнування з'єднання нижньої стінки (з або без витоку на з'єднаннях), деформація та розрив системи вхідного/вихідного трубопроводу з ймовірною втратою вмісту, а в деяких випадках і повне руйнування резервуара. Пружне вигин також може виникнути на нижній пластині через наявність осьових напруг на додаток до гідростатичного тиску, який штовхає пластину вниз, коли вона прагне піднятися.

• **Пошкодження верхнього ярусу та даху.** Пошкодження покрівлі зазвичай викликано коливанням конвективної маси, у випадку, коли надводний борт між поверхнею рідини та покрівлею недостатній. Часто амплітуда хвиль рідини може перевищувати кілька метрів, про що свідчить наявність подряпин у верхньому ряду стіни, утворених ударом плаваючого даху¹⁴⁹. У разі повного або майже повного резервуара на фіксованому даху, плескаючий рух призводить до збільшення тиску, що тисне на дах. Загальноприйняті норми та стандарти не містять положень щодо адекватної конструкції покрівлі під впливом ударних сил. Звіти про минулі землетруси показали, що у випадку стаціонарного даху руйнування може виникнути на стиках між стіною корпусу та дахом, на плиті даху у вигляді викривлення, у вентиляційних отворах, у переливних трубах та інших пристосуваннях. Плаваюча покрівля може бути піддана викривленню плити палуби, пошкодженню понтону, водостоків, ущільнювачів, пристроїв, що запобігають обертанню, поворотної лінії та поворотних з'єднань. Здається, що сталевий дах із

¹⁴⁹ D'Amico M. Seismic fragility and dynamic behavior of atmospheric cylindrical steel tanks. [Dissertation thesis]. Alma Mater Studiorum Università di Bologna. Dottorato di ricerca in Ingegneria civile, chimica, ambientale e dei materiali, 30 Ciclo. 2018. URL: <https://doi.org/10.6092/unibo/amsdottorato/8660> [28].

вигнутими шарнірними з'єднаннями працює краще¹⁵⁰, але опорні балки та колони можуть бути пошкоджені силою коливань рідини. Значні пошкодження даху та верхньої частини стінки корпусу можуть призвести до розливу рідини. Однак втрата вмісту, пов'язана з цією частиною конструкції резервуара, дуже мала в порівнянні з тією, що спричинена поломкою нижньої частини.

• **Порушення кріплення.** Система анкерного кріплення широко використовується у випадку тонкого резервуара через високе розташування центру маси рідини, а потім необхідність протидіяти моменту перекидання. Найбільш поширена система кріплення для сталевих резервуарів складається з утримуючих болтів, ременів або стільців. У разі сильного землетрусу анкерна система може виявитися недостатньою для того, щоб витримати сейсмічне навантаження, і це зазвичай призводить до виривання якоря, розтягування або руйнування. Однак поломка якорів рідко призводить до втрати вмісту бака.

• **Порушення фундаменту.** Ферми для зберігання рідких вуглеводнів часто розташовані в прибережних районах, тому це призводить до поганого ґрунту основи та проблеми розрідження під сейсмічним впливом. Під час землетрусу в Ніігата в 1964 році на нафтопереробному заводі Ніігата компанії Showa Oil Co. великі резервуари для сировини нафти, побудовані на неуцільненому ґрунті, витримали осідання на кілька сантиметрів, обертання основи та наступні проблеми, такі як поломка трубопроводів і витіки¹⁵¹. У подібних ситуаціях втрата вмісту спричинила значне зменшення опорних матеріалів під основою резервуара, а потім збільшення структурних пошкоджень. Під час землетрусу в Міягі в 1978 році кільцева днища деяких резервуарів на НПЗ Tohoku Oil Sendai через осідання деформувалася настільки, що з пластиною оболонки утворився гострий кут¹⁵². Польові перевірки також виявили інші види руйнування фундаменту, такі як тріщини кільцевої стіни та руйнування бетонної площадки. У разі недостатньо стриманих резервуарів від підйому вертикальні зсуви викликають додаткові напруги розтягування в опорній плиті, а в деяких випадках – розрив з'єднання стінка-дно та зварних швів опорної плити. Крім того, ковзаючи рухи можуть пошкодити резервуар і арматуру.

¹⁵⁰ Там само [28].

¹⁵¹ Там само [28].

¹⁵² Там само [28].

• **Поломка системи трубопроводів.** Поломка трубопроводу може мати кілька причин. Досвід показує, що вертикальні та бічні рухи бака призводять до поломки арматури, фланців та фітінгів, від'єднання та розриву труб. Зокрема, відомо, що жорсткі трубопроводи дуже схильні до пошкоджень під час сейсмічної дії. Наявність гнучкої петлі в трубі між резервуаром і незалежною опорою трубопроводу має сприяти кращій роботі комплексу. Пошкодження трубопроводів призвело б до витрат на ремонт лише від 1 % до 2 % від замінної вартості резервуару, але призвело б до повного виходу резервуара з експлуатації одразу після землетрусу¹⁵³. Дійсно, залежно від ступеня пошкодження кількість витоків може бути різною, а також подальші сценарії. Поломка трубопроводу також може виникнути в разі великого вигину в основі резервуара через великі деформації оболонки в місці з'єднання між трубою та резервуаром. Закопані труби, з'єднані з нижньою плитою, зламалися у разі бокового руху та підйому, як, наприклад, у випадку землетрусу в Лома-Прієта в 1989 році¹⁵⁴.

¹⁵³ Serikova E., Strelnikova E., Yakovlev V. The Programme of Measures to Prevent Flooding on the Built-up Areas on Example of Kharkiv City. *International Journal of Development Research*. 2015. Vol. 5(12). P. 6236–6240 [66].

¹⁵⁴ Гавадзин Н. О. Природно-техногенні процеси та економічні збитки від шкідливих впливів нафтогазових підприємств на навколишнє середовище. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2010. № 1. С. 125–130 [285]; Максимюк М. Р., Міцкевич Д. І., Міцкевич А. І. Нафтове забруднення поверхневих вод та шляхи подолання його наслідків. Наукові праці Чорноморського державного університету імені Петра Могили комплексу «Києво-Могилянська академія». Сер.: Техногенна безпека. 2014. Т.233, Вип. 221. С. 37–40 [286]; Курганський В. М., Тішаєв І. В. До питання забруднення оточуючого середовища в процесі буріння нафтових та газових свердловин. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. 2006. № 38. С. 7–9 [287]; Іванюта С. Моніторинг та оцінювання екологічних ризиків техногенного походження. Аналітична доповідь Київ : Вид-во НІСД, 2012. 52 с. [288]; Рудько Г. І., Адаменко Я. О., Пилипенко А. А. та ін.. Оцінка впливів на навколишнє середовище (ОВНС) при експлуатації Новосхідницького нафтового родовища. Геоелекологічні проблеми Івано-Франківщини та Карпатського регіону: зб. наук. праць. Івано-Франківськ: ЕКОР. 1998. С. 149–196 [289]; Крайнюков О. М. Особливості розповсюдження вуглеводневого забруднення та оцінка його впливу на геоелекологічний стан басейну р. Сіверський Донець у межах Харківської області : автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 11.00.11 «Конструктивна географія і раціональне використання природних ресурсів». Харків, 2007. 20 с. [290]; Іщук Ю. Л., Кобилянський Є. В., Кочірко Б. Ф. Біорозщеплюваність нафтопродуктів і

проблеми біосфери. *Нафтова і газова промисловість*. 2004. № 1. С. 57–60 [291]; Гринюк В. І. Міграція нафтопродуктів в зоні впливу нафтогазовидобувних підприємств. Сучасний стан та якість навколишнього середовища окремих регіонів: зб. наук.праць Міжнародної наукової конференції молодих вчених. (Одеса, 1–3 червня 2016 р.). 2016. С. 85–88 [292]; Гринюк В. І. Техногенне навантаження нафтогазовидобувних підприємств на водне середовище. XVI Всеукраїнська наук.-техн. конф. (Одеса, 14 квітня 2016 р.). 2016. С. 22–24 [293]; Тимченко І. В. Дослідження моделей розповсюдження нафтових забруднень в умовах обмежених акваторій. *Електронний вісник НУК*. 2010. № 1 [294]; Ковач В. О. Аналіз надзвичайних ситуацій, пов'язаних із розливами нафти внаслідок аварій танкерів та інших суден. Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ ім Г.Є. Пухова НАН України. 2016. Вип. 77. С. 73–82 [295]; Ковач В. О. Розробка математичних засобів для оцінки рівня забруднення поверхні моря в результаті розливу нафти: матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (Черкаси, 19–20 травня 2016 р.). Черкаси : ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2016. С. 63–65 [296]; Харламова О. В. Науково-методологічні основи управління екологічною безпекою в умовах природно-антропогенного навантаження : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 21.06.01. Суми, 2018. 38 с. [297]; Челядин Л. І., Григорчук Л. І., Челядин В. Л., Богославець М. М. Методи та устаткування зменшення забруднення водних ресурсів стоками з об'єктів нафтогазового комплексу. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2013. № 2(47). С. 145–151 [298]; Бондарець Ю. В., Матвеева О. Л. Аналіз технологій ліквідації нафторозливів із застосуванням сорбентів на основі торфового моху роду *Sphagnum*. *Проблеми екологічної біотехнології*. 2013. № 1. URL: <http://jrn1.nau.edu.ua/index.php/ecobiotech/article/view/4732> [299]; Назаренко С. К., Архипова Л. М. Сучасні методи ліквідації аварійних розливів нафти на водних об'єктах суходолу. *Науковий вісник ІваноФранківського національного технічного університету нафти і газу*. 2016. № 1. С. 72–79 [300]; Zhao H., Liu J.-S. The feasibility study of extinguishing oil tank fire by using compressed air foam system. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 135. P. 61-66. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.080> [301]; Xu-Qing L., Quan-Zhen L., Hong G. Study of fire fighting system to extinguish full surface fire of large scale floating roof tanks. *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 11. P. 189-195. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.646> [302]; Чернецький В. В. Вплив теплових факторів пожежі на цілісність вертикальних сталевих резервуарів з нафтопродуктами : дис. ... канд. тех. наук: 21.06.02. ЛДУБЖД. Львів. 2015 [303]; Кондратович О. А., Оразбаєв А. Р. Визначення причини виникнення пожеж при завантаженні нафтопродуктів в резервуари. *Надзвичайні ситуації: попередження і ліквідація*. 2018. Вип. 1. С. 77–82 [304]; Charuaud L., Jarde E., Jaffrezic A., Thomas M.-F., Le Bot B. Veterinary pharmaceutical residues from natural

Очевидно, що пошкодження системи розвантажувального трубопроводу є менш серйозним з точки зору втрати вмісту, ніж пошкодження вхідного/вихідного трубопроводу.

3.3. Використання резервуарів різних форм для зберігання рідин при вітрових та сейсмічних навантаженнях

Призматичні резервуари широко використовуються в різних галузях сучасної техніки та будівництва як резервуари, ємності, шлюзи гідротехнічних споруд. Вони також використовуються для зберігання різноманітних рідин: питної та пожежної води, нафти, зрідженого газу, вина тощо (Рисунок 3.7.).



Рисунок 3.7 – Призматичний резервуар

water to tap water: Sales, occurrence and fate. *Journal of Hazardous Materials*. 2019. Vol. 361. P. 169–186. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.08.075> [305]; Gros M., Mas-Pla J., Boy-Roura M., Geli I., Domingo F., Petrović M. Veterinary pharmaceuticals and antibiotics in manure and slurry and their fate in amended agricultural soils: Findings from an experimental field site (Baix Empordà, NE Catalonia). *Science of The Total Environment*. 2019. Vol. 654. P. 1337–1349. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.061> [306].

На великих фермах в таких ємностях зберігають рідкі добрива, пальне для сільськогосподарської техніки, гній, силос і так далі. Ці речовини часто зберігаються централізовано у великих кількостях, що збільшує ризик шкоди навколишньому середовищу. Витік речовин, що зберігаються, може бути пов'язаний з недостатньою герметичністю резервуарів для зберігання, аваріями або ненавмисними діями операторів або обслуговуючого персоналу, а також сейсмічними навантаженнями. Екологічна небезпека речовин, які використовуються в сільському господарстві, в основному спричинена високою концентрацією поживних речовин, а також можливою присутністю патогенів, ветеринарних¹⁵⁵ або токсичністю для водних організмів (наприклад, бензин, деякі пестициди). Сільськогосподарські відходи також можуть мати високу біологічну потребу в кисні, де біологічна потреба в кисні великої рогатої худоби може бути в 50 разів вищою, ніж побутові стічні води. Результатом може бути загибель гідробіонтів¹⁵⁶.

Резервуари для зберігання нафтопродуктів є екологічно небезпечними джерелами техногенного впливу на навколишнє середовище, виступаючи об'єктами неконтрольованих викидів пароповітряних або парогазоповітряних сумішей і розливів нафтопродуктів з наступними пожежами і вибухами. Екологічне значення зберігання значною мірою залежить від його потенціалу забруднення навколишнього середовища та від фізичних і хімічних властивостей речовин, що зберігаються. Для зберігання бензину та дизельного палива на фермі використовуються нафтові резервуари. Правильно спроектовані приміщення для зберігання нафти повинні

¹⁵⁵ Charuaud L., Jarde E., Jaffrezic A., Thomas M.-F., Le Bot B. Veterinary pharmaceutical residues from natural water to tap water: Sales, occurrence and fate. *Journal of Hazardous Materials*. 2019. Vol. 361. P. 169–186. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.08.075> [305]; Gros M., Mas-Pla J., Boy-Roura M., Geli I., Domingo F., Petrović M. Veterinary pharmaceuticals and antibiotics in manure and slurry and their fate in amended agricultural soils: Findings from an experimental field site (Baix Empordà, NE Catalonia). *Science of The Total Environment*. 2019. Vol. 654. P. 1337–1349. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.061> [306].

¹⁵⁶ Trávníček P., Kotek L., Junga P., Koutný T., Novotná J., Vítěz T. Prevention of accidents to storage tanks for liquid products used in agriculture. *Process Safety and Environmental Protection*. 2019. Vol. 128. P. 193–202 [307].

запобігати витоку та потенційному забрудненню ґрунту, поверхневих або ґрунтових вод¹⁵⁷.

Конічним оболонкам у взаємодії з рідиною в науковій літературі приділено значно менше уваги, незважаючи на широке використання тонкостінних конічних оболонок у різних галузях техніки¹⁵⁸. В аерокосмічній техніці такі оболонки застосовувалися як паливні баки в літаках і супутниках. Відомо використання снарядів у підводних човнах, торпедах, балістичних ракетах водного базування та морських бурових установках океанічної техніки. Що стосується цивільного будівництва, конічні оболонки застосовувалися в захисних контейнерах у піднятих резервуарах для води (Рисунок 3.8.).



Рисунок 3.8 Резервуар конічної форми.

¹⁵⁷ Tadros A. F. F. Environmental aspects of petroleum storage in above ground tank. *E3S Web of Conferences The International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2020)*. 2020. Vol. 166. 01006. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016601006> ICSF 2020 [247].

¹⁵⁸ Vescovini R., Fantuzzi N. Free vibrations of conical shells via Ritz method. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2023. Vol. 241:107925. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107925> [308].

На сьогоднішній день циліндричні ємності є найпопулярнішими конструктивними рішеннями для зберігання нафтопродуктів, води та інших рідин. Оскільки саме циліндр визнаний найергономічнішою та надійнішою формою ємності для зберігання будь-яких рідин, циліндричні резервуари знаходять застосування на підприємствах паливно-енергетичного комплексу, на підприємствах легкої та харчової промисловості, використовуються для зберігання палива, запасів харчової та технічної води, у тому числі і як протипожежні ємності (Рисунок 3.9.).



Рисунок 3.9 Циліндричний резервуар

В монографії розглянуто резервуари циліндричної, призматичної та конічної форми, проведено математичне моделювання коливань рідини в резервуарах різної форми та різного призначення. Розроблено методи, що дозволяють оцінити рівень підйому вільної поверхні в резервуарах при раптово виниклих навантаженнях різного характеру.

Метою амортизаційного пристрою є зменшення руйнівної енергії, що впливає на конструкцію внаслідок динамічних навантажень, таких як вітер і землетрус. Існують різні системи, призначені для збільшення амортизації конструкції та зменшення відносних переміщень. Найвідомішими прикладами є в'язкорідинні гасителі, засновані на принципі проходження рідини з високою в'язкістю через

трубу, який був запропонований у 1992 році Константи́ну¹⁵⁹. Відповідно до принципів роботи, регульовані масові демпфери, які забезпечують горизонтальний контроль конструкції, і регульовані рідинні демпфери зазвичай використовуються особливо у високих конструкціях. Основний принцип відрегульованого рідинного демпфера заснований на поглинанні кінетичної енергії конструкції так само, як і відрегульовані масові демпфери.

3.4. Зберігання рідини в призматичних резервуарах при вібраційних навантаженнях

Регулярна експлуатація, передремонтні та ремонтні роботи на резервуарах з нафтопродуктами, а також витіки нафтопродуктів під дією сейсмічних навантажень є джерелом техногенного впливу на навколишнє середовище внаслідок виникнення екологічно небезпечних ситуацій, що супроводжуються вибухами та пожежі та становлять реальну загрозу життю та здоров'ю населення. Тому дослідження впливу коливань і вібрацій на резервуари для зберігання екологічно небезпечних рідин та оцінка зменшення навантаження на природу є досить актуальною науково-практичною проблемою підвищення екологічної безпеки прилеглих до резервуарів територій¹⁶⁰.

В монографії розглядаються призматичні резервуари для зберігання екологічно небезпечних рідин. Середовище всередині

¹⁵⁹ Там само [308].

¹⁶⁰ Khalmuradov B. D., Harbuz S. V., Ablieieva I. Y. Analysis of the technogenic load on the environment during forced ventilation of tanks. *Technology audit and production reserves*. 2018. № 1/3 (39). P. 45–52 [99]; Гарбуз С. В. Системний підхід до зниження екологічної небезпеки вентиляції резервуарів з нафтопродуктами. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Сер.: Механіко-технологічні системи та комплекси*. Харків: НТУ «ХПІ», 2016. № 7 (1179). С. 106–118 [100]; Khalmuradov B., Harbuz S., Ablieieva I. Analysis of the technogenic load on the environment during Forced ventilation of tanks. *Technology audit and production reserves*. 2018. Vol. 1/3 (39). P. 45–52. URL: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.124341> [101]; Dadashov I., Loboichenko V., Kireev A. Analysis of the ecological characteristics of environment friendly fire fighting chemicals used in extinguishing oil products. *Pollution Research*. 2018. Vol. 37 (1). P. 63–77 [146].

резервуарів істотно вплинуло на їх динамічні характеристики (частоти і режими коливаль) і напружено-деформований стан. Якщо конструкція резервуара, що лежить на землі, зазнає динамічних або кінематичних впливів в результаті землетрусів, імпульсної складової тиску хвилі та інших збурень, то її реакція (переміщення, сили, частоти та режими вібрації) істотно залежить від ступеня наповнення резервуара, пружні властивості фундаментів, а також інерційні характеристики жорсткості самої конструкції.

Поломки цих резервуарів після руйнівних землетрусів або вибухівки можуть призвести до екологічних катастроф, втрати цінного вмісту та зриву заходів з гасіння пожежі. Розбризування рідини також є причиною пошкодження даху і верхніх стінок резервуарів. Невідповідно сконструйовані резервуари та сховища рідини були пошкоджені під час минулих сильних землетрусів.

Комплексні огляди явища плескання, включаючи аналітичні прогнози та експериментальні спостереження, зроблені в різних роботах¹⁶¹. Доведено, що точні рішення для лінійного плескання рідини обмежені геометрією резервуарів з прямими стінками, у вигляді прямокутних і циліндричних контейнерів.

Крім того, важко або неможливо отримати аналітичні рішення для резервуарів і резервуарів складної геометричної форми. Тому було реалізовано багато чисельних методів для розв'язування лінійних крайових задач розплескування рідини. Було проведено різноманітні спрощені теоретичні дослідження¹⁶², а також розроблено інші чисельні методи. Деякі з цих досліджень були використані як основа для поточних стандартів проектування. Райновський і Тимоха¹⁶³ розробили

¹⁶¹ Gnitko V., Degtyariev K., Naumenko V., Strelnikova E. BEM and FEM analysis of the fluidstructure interaction in tanks with baffles, *Int. Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. 2017. Vol. 5 (3). P. 317–328. URL: <https://doi.org/10.2495/CMEM-V5-N3-317-328> [156]; Zheng Jh., Xue M. A., Dou P., et al. A review on liquid sloshing hydrodynamics. *J Hydrodyn*. 2021. Vol. 33. P. 1089–1104. URL: <https://doi.org/10.1007/s42241-022-0111-7> [157].

¹⁶² Zheng Jh., Xue M. A., Dou P., et al. A review on liquid sloshing hydrodynamics. *J Hydrodyn*. 2021. Vol. 33. P. 1089–1104. URL: <https://doi.org/10.1007/s42241-022-0111-7> [157].

¹⁶³ Raynovskyy I. A., Timokha A. N. Sloshing in Upright Circular Containers:

аналітичний лінійний мультимодальний метод для аналізу 2D плескання рідини в горизонтальних циліндричних резервуарах. Метод об'єму рідини розроблено в роботі Zheng Jh., Xue M. A., Dou P.¹⁶⁴. Динамічний аналіз заповнених рідиною оболонкових конструкцій з використанням сумісних методів кінцевих і граничних елементів було виконано в роботі Degtyariev K., Gnitko V., Kononenko Y., Kriutchenko D., Sierikova O., Strelnikova E.¹⁶⁵.

Було запропоновано багато пристроїв для демпфування бризок для гасіння руху рідини, зменшення структурних навантажень, викликаних розливом рідини, і запобігання нестабільності. Це жорсткі або пружні пристрої різного розміру та орієнтації, кільцеві перегородки та різні пластини, які частково покривають вільну поверхню. Розробка систем демпфування вимагає кількісного знання характеристик хлюпання.

На практиці ефект перегородок можна було побачити після встановлення перегородок. Однак такі експериментальні дослідження занадто дорогі. Тому розробка обчислювальних технологій для якісного чисельного моделювання є дуже актуальною проблемою.

У роботі розглядаються вільні та вимушені коливання рідини в призматичних резервуарах, заповнених нестисливою ідеальною рідиною. Були розглянуті резервуари як з горизонтальними, так і з

Theory, Analytical Solutions, and Applications. CRC Press/Taylor & Francis Group. 2020. 170 p. [158].

¹⁶⁴ Zheng Jh., Xue M. A., Dou P., et al. A review on liquid sloshing hydrodynamics. *J Hydrodyn.* 2021. Vol. 33. P. 1089–1104. URL: <https://doi.org/10.1007/s42241-022-0111-7> [157]; Nahorny V. V., Shevchenko A. V., Lyashchuk V. I., et al. Hydrogeodeformation monitoring as a tool for earthquake prediction in the Dnieper-Krivoy Rog aulacogen. *Journal of Geodynamics.* 2020. Vol. 136. P. 101718 [158].

¹⁶⁵ Degtyariev K., Gnitko V., Kononenko Y., Kriutchenko D., Sierikova O., Strelnikova E. Fuzzy Methods for Modelling Earthquake Induced Sloshing in Rigid Reservoirs. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2022. P. 297-302. URL: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916466> [155]; Sierikova O., Strelnikova E., Degtyarev K. Seismic Loads Influence Treatment on the Liquid Hydrocarbon Storage Tanks Made of Nanocomposite Materials. *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*. 2022. Vol. 17. P. 62-70. URL: <https://doi.org/10.37394/232011.2022.17.9> [55].

вертикальними перегородками. Встановлено зміну динамічної поведінки пласта з внутрішньою перегородкою. До розглянутих конструкцій передбачалося прикладати гармонічні та імпульсні навантаження.

У роботі розглянуто питання, пов'язані з коливаннями рідини в жорстких призматичних і циліндричних резервуарах (Рисунок 3.10). Розглянуті резервуари представлені на рисунку 3.10. У циліндричних резервуарах встановлені горизонтальні та вертикальні перегородки. На першому етапі водойми мають свої режими і частоти. Їхні власні режими використовувалися як базові системи для проблем вимушеної вібрації під гармонічними та імпульсними навантаженнями.

Рідина в контейнерах вважалася ідеальною і нестисливою, а рух рідини, викликаний коливаннями оболонки, безобертальним. Тоді його відносна швидкість $\mathbf{V}$ має потенціал $\Phi = \Phi(t, x, y, z)$, тому

$$V_x = \frac{\partial \Phi}{\partial x}; V_y = \frac{\partial \Phi}{\partial y}; V_z = \frac{\partial \Phi}{\partial z}. \quad (3.1)$$

Зволожена поверхня оболонки була позначена S_1 , а вільна поверхня як S_0 . Припустимо, декартова система координат $Oxyz$ була пов'язана з розглянутими контейнерами, вільною поверхнею рідини S_0 збігається з площиною $z = 0$ у стані спокою. Якщо на оболонку, наповнену рідиною, діє сила, що діє в горизонтальній площині, то осі координат з ортами можна вибрати так, щоб прискорення $\mathbf{a}_s$ було розглянуто як

$$\mathbf{a}_s = a_s(t) \mathbf{i}, \quad (3.2)$$

де коефіцієнт $a_s(t)$ залежить тільки від часу t , та $\mathbf{i}$ є одиничним вектором уздовж Ox .

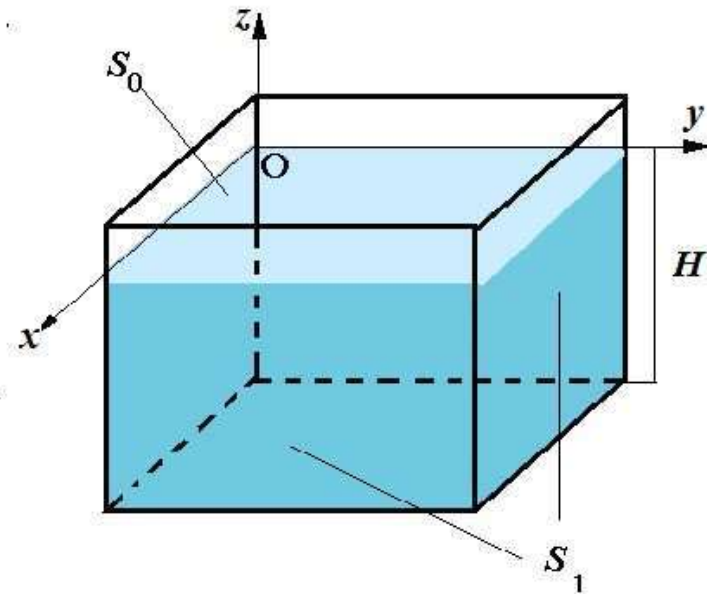
По-перше, було отримано співвідношення між потенціалом швидкості, прискореннями за рахунок рушійних сил і тиском рідини. Рівняння (2) отримано в такому вигляді:

$$\mathbf{a}_s = \nabla [x \cdot a_s(t)] \quad (3.3)$$

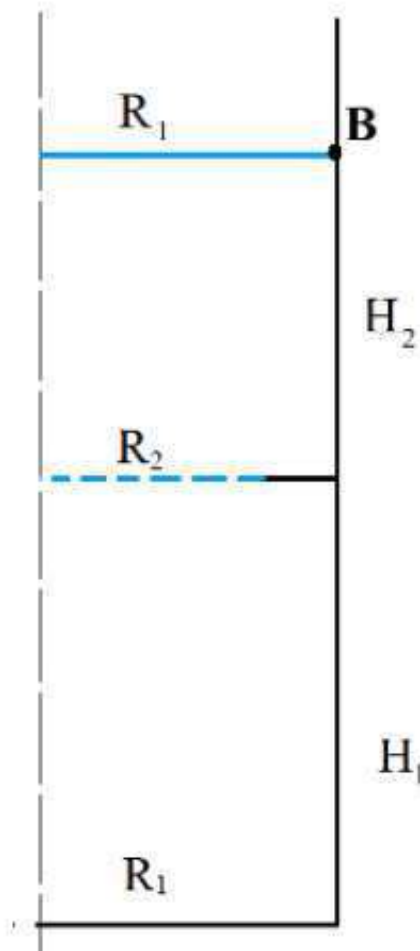
Зазначимо, що для прискорення сили тяжіння отримано форму

$$\mathbf{g} = -\nabla(\rho g z),$$

де g це прискорення сили тяжіння, z – вертикальна координата



точки в рідині.



а)

б)

Рисунок 3.10 – Частково заповнені рідиною резервуари

Рівняння руху ідеальної рідини можна представити у векторній формі наступним чином:

$$\rho \mathbf{w} + \nabla(\rho x a_s(t)) + \nabla(\rho g z) = -\nabla p,$$

де $\mathbf{w}$ – це прискорення потоку рідини, ρ – густина рідини, та p – тиск рідини. При $\rho = \text{const}$ справедливе таке співвідношення:

$$\mathbf{w} + \nabla(x a_s(t)) + \nabla(g z) = -\frac{\nabla p}{\rho}. \quad (3.4)$$

Тому прискорення частинки рідини під дією гравітаційних сил і горизонтальних збуджень завжди має потенціал (аналог потенціалу Прандтля). Рушійні сили зазвичай розглядаються починаючи зі стану спокою. Таким чином, згідно з теоремою Кельвіна, якщо рух рідини починається зі стану спокою, то її відносна швидкість $\mathbf{V}$ має потенціал.

Отримано формулу для тиску (рівняння Бернуллі) з урахуванням сили тяжіння та горизонтальних прискорень. Використовуючи рівняння (3.4) і припускаючи, що потік безобертовий, отримано рівняння Бернуллі у такому вигляді:

$$p - p_0 = -\rho \left[\frac{\partial \Phi}{\partial t} + a_s(t)x + g z + \frac{1}{2} |\nabla \Phi|^2 \right], \quad (3.5)$$

де p_0 – це для атмосферного тиску.

Якщо були розглянуті малі коливання рідини (вивчено лінеаризоване формулювання), то $|\nabla \Phi|^2 \ll 1$, і отримано формулу

$$p - p_0 = -\rho \left[\frac{\partial \Phi}{\partial t} + a_s(t)x + g z \right]. \quad (3.6)$$

Тиск p на стінках оболонки за відсутності горизонтальної об'ємної сили визначали з лінеаризованого рівняння Бернуллі за формулою:

$$p = -\rho \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + g z \right) + p_0, \quad (3.7)$$

Формули (3.5)-(3.7) показують, що для отримання тиску рідини необхідно отримати потенціал рідини Φ . Було припущено, що потік є нев'язким і нестисливим, безобертовий рух рідини в тривимірному резервуарі описується рівнянням Лапласа для потенціалу швидкості Φ

$$\nabla^2 \Phi = 0. \quad (3.8)$$

Для визначення цього потенціалу була сформульована змішана крайова задача для рівняння Лапласа. Умова непроникнення на зволожених поверхнях бака S_1 було застосовано [Strelnikova]

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{n}} \right|_{S_1} = 0.$$

На вільній поверхні ($z = 0$), мають бути виконані такі динамічні та кінематичні граничні умови:

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial n} \right|_{S_0} = \frac{\partial \zeta}{\partial t}; \quad p - p_0|_{S_0} = 0,$$

де невідома функція $\zeta = \zeta(x, y, t)$ описує форму та положення вільної поверхні.

Отже, для потенціалу швидкості отримано наступну крайову задачу

$$\nabla^2 \Phi = 0; \quad \left. \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{n}} \right|_{S_1} = 0; \quad \left. \frac{\partial \Phi}{\partial n} \right|_{S_0} = \frac{\partial \zeta}{\partial t}; \quad p - p_0|_{S_0} = 0. \quad (3.9)$$

де $p - p_0$ було отримано з рівняння (6) при $z = \zeta(t, x, y)$.

Щоб розрахувати коливання рідини за наявності перегородок, розглянемо спочатку циліндричну оболонку з кільцевою перегородкою, Рис. 16). Нехай зволожена поверхня буде $S_1 = S_{11} \cup S_{12} \cup S_{\text{bot}} \cup S_{\text{baf}}$,

Використано багатодомений (граничних суперелементів) метод. Зверніть увагу, що він ввів «штучну» поверхню розділу S_{int} і розділив область, заповнену рідиною, на дві частини. $\Sigma_1; \Sigma_2$, обмежені поверхнями $S_{11}, S_{\text{baf}}, S_{\text{int}}, S_{\text{bot}}$ та $S_{12}, S_{\text{baf}}, S_{\text{int}}, S_0$, відповідно. На поверхні інтерфейсу S_{int} , встановлено такі граничні умови¹⁶⁶:

¹⁶⁶ Guo Y., Iyer S. Regularity and expansion for steady Prandtl equations, *Comm. Math. Phys.* 2021. 382(3). P. 1403–1447 [220]; Behshad A., Reza Shekari M., 2018. A Boundary Element Study for Evaluation of the Effects of the Rigid Baffles on Liquid Sloshing in Rigid Containers. *International journal of maritime technology*. 2018. Vol.10. P. 45–54. URL: <https://doi.org/10.29252/ijmt.10.45> [221].

$$\Phi|_{S_{\text{int}} \cap \partial \Sigma_1} = \Phi|_{S_{\text{int}} \cap \partial \Sigma_2}; \quad \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{n}}|_{S_{\text{int}} \cap \partial \Sigma_1} = -\frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{n}}|_{S_{\text{int}} \cap \partial \Sigma_2} \quad (3.10)$$

Очевидно, що нульове власне значення існує для задачі (3.9), але його було виключено за допомогою такої умови ортогональності:

$$\iint_{S_0} \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{n}} dS_0 = 0. \quad (3.11)$$

Отже, були отримані рівняння (3.9)-(3.11) для обчислення невідомих функцій $\zeta = \zeta(x, y, t)$ та $\Phi = \Phi(t, x, y, z)$.

Для призматичного резервуара, зображеного на рисунку 3.10 а), можна було розв'язати крайову задачу (3.9) за допомогою рівняння (3.11).

Метод декомпозиції мод

Для всіх наведених крайових задач розглянемо отримані допоміжні крайові задачі

$$\nabla^2 \psi = 0, \quad \frac{\partial \psi}{\partial \mathbf{n}}|_{S_1} = 0, \quad \frac{\partial \psi}{\partial \mathbf{n}}|_{S_0} = \frac{\partial \zeta}{\partial t}; \quad \frac{\partial \psi}{\partial t} + g\zeta = 0. \quad (3.12)$$

Продиференціюйте другу кореляцію в (5.12) за t і заміник отримав рівність для $\frac{\partial \zeta}{\partial t}$ в перше відношення. Далі допоміжна функція ψ як $\psi(t, x, y, z) = e^{i\chi t} \varphi(x, y, z)$ була представлена.

Дійшло до проблеми власних значень

$$\nabla^2 \varphi = 0, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}}|_{S_1} = 0, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}} = \frac{\chi^2}{g} \varphi|_{S_0}, \quad \iint_{S_0} \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}} dS_0 = 0. \quad (3.13)$$

Припустимо, що розв'язки задачі на власні значення (3.13) є власними модами φ_k з відповідними власними частотами χ_k . Розглянемо тепер потенціал Φ у такому вигляді:

$$\Phi = \sum_{k=1}^M \dot{d}_k \varphi_k . \quad (3.14)$$

Як рівняння вільної поверхні отримано такий вираз:

$$\zeta = \sum_{k=1}^M d_k \frac{\partial \varphi_k}{\partial n} . \quad (3.15)$$

Зведення до систем граничних інтегральних рівнянь

Для призматичних резервуарів крайову задачу (3.9), (3.11) розв'язували аналітично за допомогою методу Фур'є поділу змінних.

Оболонка обертання з перегородками та без

Розглянемо крайову задачу (3.9),(3.11) для циліндричної оболонки без перегородок.

Передбачається, що розглянута структура є оболонкою обертання в циліндричній системі координат (r, z, θ) тож, було здобуто

$$\varphi_k(r, z, \theta) = \varphi_k(r, z) \cos \alpha \theta, \quad \alpha = 0, 1, \dots, \quad k = 1, 2, \dots . \quad (3.16)$$

Тут α – номер гармоніки, індекси k для номерів режимів, відповідних α . Таким чином, частоти і моди вільних коливань розглядаються окремо для різних значень α .

Відкидання індексів k , основного співвідношення для визначення функцій φ_k можна записати у формі [19,20]

$$2\pi\varphi(P_0) = \iint_S \frac{\partial \varphi}{\partial \mathbf{n}} \frac{1}{|P - P_0|} dS - \iint_S \varphi \frac{\partial}{\partial \mathbf{n}} \frac{1}{|P - P_0|} dS . \quad (3.17)$$

Тут $S = S_1 \cup S_0$; обидві точки P та P_0 належать до поверхні S . Через $|P - P_0|$ позначено декартову відстань між точками P та P_0 .

З граничними умовами (3.9) отримано систему інтегральних рівнянь у вигляді [6,7]

$$\left\{ \begin{aligned} 2\pi\psi_1 + \iint_{S_1} \psi_1 \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) dS_1 - \frac{\kappa^2}{g} \iint_{S_0} \psi_0 \frac{1}{r} dS_0 + \iint_{S_0} \psi_0 \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \right) dS_0 &= 0, \\ - \iint_{S_1} \psi_1 \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{r} \right) dS_1 - 2\pi\psi_0 + \frac{\kappa^2}{g} \iint_{S_0} \psi_0 \frac{1}{r} dS_0 &= 0. \end{aligned} \right. \quad (3.18)$$

Тут для зручності його позначено ψ_0 значення потенціалу на вільній поверхні і по ψ_1 його значення на стінках оболонки.

У формі (5.16) шукано рішення для системи (5.18).

Нижче наведено такі інтегральні оператори:

$$\begin{aligned} A\psi_1 &= 2\pi\psi_1 + \iint_{S_1} \psi_1 \frac{\partial}{\partial n} \frac{1}{r(P, P_0)} dS_1; \quad B\psi_0 = \iint_{S_0} \psi_0 \frac{1}{r} dS_0; \\ C\psi_0 &= \iint_{S_0} \psi_0 \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \right) dS_0; \\ D\psi_1 &= - \iint_{S_1} \psi_1 \frac{\partial}{\partial n} \frac{1}{|P - P_0|} dS_1; \quad F\psi_0 = \iint_{S_0} \psi_0 \frac{1}{r} dS_0. \end{aligned} \quad (3.19)$$

Тоді крайова задача (3.9) набуває вигляду

$$\begin{aligned} A\psi_1 &= \frac{\kappa^2}{g} B\psi_0 - C\psi_0; \quad P_0 \in S_1; \\ D\psi_1 &= 2\pi E\psi_0 - \frac{\kappa^2}{g} F\psi_0; \quad P_0 \in S_0. \end{aligned}$$

Після виключення функції ψ_1 із цих співвідношень була отримана наступна проблема власних значень відносно ψ_0

$$(DA^{-1}C + E)\psi_0 - \lambda(DA^{-1}B + F)\psi_0 = 0; \quad \lambda = \frac{\chi^2}{g}.$$

Його рішення дає природні режими і частоти плескання рідини в жорсткому резервуарі. Обчислення інтегральних операторів у (3.20)

здійснено методом, запропонованим у роботі Gnitko V., Degtyariov K., Karaiev A., Strelnikova E.¹⁶⁷.

Визначивши основні функції φ_k , підставимо їх у вирази (3.15) для потенціалу швидкості та (3.16) для висоти вільної поверхні. Потім підставте отримані співвідношення в граничну умову на вільній поверхні, що відповідає застосуванню динамічної умови¹⁶⁸.

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial t} + g\zeta + a_s(t)x \right|_{s_0} = 0$$

Як і в циліндричній системі координат $x = \rho \cos \theta$, інтерес могла представляти лише перша гармоніка, тобто у формулі (3.16) вона лише врахована $\alpha=1$. Крім того, на поверхні може бути таке рівняння S_0

$$\sum_{k=1}^M \ddot{d}_k \varphi_k + g \sum_{k=1}^M d_k \frac{\partial \varphi_k}{\partial n} + a_s(t)\rho = 0.$$

Через виконання співвідношення (5.14) на поверхні S_0 наведена вище рівність набуває вигляду

$$\sum_{k=1}^M \ddot{d}_k \varphi_k + \sum_{k=1}^M \chi_k^2 d_k \varphi_k + a_s(t)\rho = 0. \quad (3.20)$$

Виконання скалярного добутку рівності (3.20) на $\varphi_l (l = \overline{1, M})$ і використовуючи ортогональність власних мод, отримано систему звичайних диференціальних рівнянь другого порядку

¹⁶⁷ Gnitko V., Degtyariov K., Karaiev A., Strelnikova E. Multi-domain boundary element method for axisymmetric problems in potential theory and linear isotropic elasticity. WIT Transactions in Engineering Sciences. WIT Press: Southampton and Boston. 2019. vol. 122. P. 13–25. URL: <https://doi.org/10.2495/BE410021> [218]; Srivastava H. M. Integral Transformations, Operational Calculus and Their Applications. Symmetry. 2020. Vol. 12(7). 1169 p. URL: <https://doi.org/10.3390/sym12071169> [219]; Guo Y., Iyer S. Regularity and expansion for steady Prandtl equations, Comm. Math. Phys. 2021. 382(3). P. 1403–1447 [220]; Behshad A., Reza Shekari M., 2018. A Boundary Element Study for Evaluation of the Effects of the Rigid Baffles on Liquid Sloshing in Rigid Containers. International journal of maritime technology. 2018. Vol.10. P. 45–54. URL: <https://doi.org/10.29252/ijmt.10.45> [221].

¹⁶⁸ Srivastava H. M. Integral Transformations, Operational Calculus and Their Applications. Symmetry. 2020. Vol. 12(7). 1169 p. URL: <https://doi.org/10.3390/sym12071169>; Guo Y., Iyer S. Regularity and expansion for steady Prandtl equations, Comm. Math. Phys. 2021. 382(3). P. 1403–1447 [219].

$$\ddot{d}_k + \chi_k^2 d_k + a_s(t) F_k = 0; \quad F_k = \frac{(\rho, \varphi_k)}{(\varphi_k, \varphi_k)}; \quad k = \overline{1, M}. \quad (3.21)$$

Припустимо, що перед застосуванням горизонтального навантаження резервуар знаходився в стані спокою. Тоді необхідно розв'язати систему (3.21) при нульових початкових умовах.

Аналогічна процедура для оболонки обертання з кільцевими перегородками була запропонована та детально описана в роботах авторів¹⁶⁹. Слід зазначити, що система диференціальних рівнянь другого порядку має вигляд (3.22), але з іншими модами та частотами.

Відповідно до розрахунків у роботі Smetankina N., Kravchenko I., Merculov V., Ivchenko D., Malykhina A.¹⁷⁰ було припущено, що для оболонки обертання з двома вертикальними перегородками можна шукати основну функцію в наступному вигляді:

$$\varphi_k(r, z, \theta) = \varphi_k(r, z) \cos 2\alpha\theta \quad \alpha = 0, 1, \dots, \quad k = 1, 2, \dots \quad (3.22)$$

Використовуючи цю кореляцію, граничні умови були задоволені на вертикальних перегородках. Система сингулярних інтегральних рівнянь для $\varphi_k(r, z)$ набуває форми, аналогічної системі (5.18). Нехай Γ – твірна поверхні S_1 . Зведенням інтегралів у цій системі до одновимірних

¹⁶⁹ Strelnikova E., Choudhary N., Kriutchenko D., Gnitko V., Tonkonozhenko A. Liquid vibrations in circular cylindrical tanks with and without baffles under horizontal and vertical excitations. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2020. Vol. 120. P. 13-27. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2020.07.02m> [29]; Choudhary N., Kumar N., Strelnikova E., Gnitko V., Kriutchenko D., Degtyarev K. Liquid vibrations in cylindrical tanks with flexible membranes. *Journal of King Saud University Science*. 2021. Vol. 33 (8). 101589. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101589> [30]; Srivastava H. M. Integral Transformations, Operational Calculus and Their Applications. *Symmetry*. 2020. Vol. 12(7). 1169 p. URL: <https://doi.org/10.3390/sym12071169> [219].

¹⁷⁰ Smetankina N., Kravchenko I., Merculov V., Ivchenko D., Malykhina A. Modelling of bird strike on an aircraft glazing. In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Kritskiy, D. (eds) *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, Cham. 2020. Vol. 1113. P. 289–297. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5_25 [37]; Sierikova O., Koloskov V., Degtyarev K., Strelnikova E. Improving the Mechanical Properties of Liquid Hydrocarbon Storage Tank Materials. *Materials Science Forum*. 2022. Vol. 1068. P. 223–229. DOI: 10.4028/p-888232 [202].

отримано систему одновимірних інтегралів такого ж вигляду, як і в роботі Dai Z.¹⁷¹. Для одновимірних інтегралів у (5.19) отримано формули

$$\iint_{S_1} \Psi \frac{\partial}{\partial n} \left(\frac{1}{|P - P_0|} \right) dS_1 = \int_r \Psi(z) \Theta(z, z_0) r(z) d\Gamma ;$$

$$\iint_{S_0} \Psi \frac{1}{|P - P_0|} dS_0 = \int_0^R \Psi(\rho) \Phi(P, P_0) \rho d\rho .$$

Тут ядра відрізняються від отриманих розрахунків у роботі Behshad A., Reza Shekari M.,¹⁷² і представлені таким чином:

$$\Theta(z, z_0) = \frac{4}{\sqrt{a+b}} \left\{ \frac{1}{2r} \left[\frac{r^2 - r_0^2 + (z_0 - z)^2}{a-b} E_\alpha(k) - F_\alpha(k) \right] n_r + \frac{z_0 - z}{a-b} E_\alpha(k) n_z \right\};$$

$$\Psi(P, P_0) = \frac{4}{\sqrt{a+b}} F_\alpha(k);$$

$$E_\alpha(k) = (-1)^\alpha (1 - 16\alpha^2)^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} \cos 4\alpha\psi \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \psi} d\psi ;$$

$$F_\alpha(k) = (-1)^\alpha \int_0^{\pi/2} \frac{\cos 4\alpha\psi d\psi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \psi}} ; a = r^2 + r_0^2 + (z - z_0)^2 ; \quad b = 2rr_0 ;$$

$$k^2 = \frac{2b}{a+b} . \quad (3.23)$$

Зазначимо, що система диференціальних рівнянь другого порядку має вигляд (3.21), але з іншими модами та частотами, отримана шляхом використання розв'язку системи інтегральних рівнянь (5.18), але з ядрами (3.23).

Вільні коливання рідини

¹⁷¹ Dai Z., Qiao H., Hao X., Wang Y., Lei H., Cui Z. Influence of Heterogeneous Foundation on the Safety of Inverted Cone Bottom Oil Storage Tanks under Earthquakes. *Buildings*. 2023. Vol. 13. 1720. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings13071720> [18].

¹⁷² Behshad A., Reza Shekari M., 2018. A Boundary Element Study for Evaluation of the Effects of the Rigid Baffles on Liquid Sloshing in Rigid Containers. *International journal of maritime technology*. 2018. Vol.10. P. 45–54. URL: <https://doi.org/10.29252/ijmt.10.45> [221].

Призматичний резервуар $\{-a \leq x \leq a, -b \leq y \leq b, 0 \leq z \leq H\}$, заповнений ідеальною нестисливою рідиною. Методом Фур'є розділення змінних визначено власні моди та частоти коливань рідини в призматичному резервуарі. Спочатку знайдено розв'язок рівняння Лапласа з граничними умовами непроникнення (перша та друга рівності в (5.9)).

$$\Psi_{kl} = A_{kl} \operatorname{ch} \lambda_{kl} z \cos \frac{\pi k}{2a} x \cos \frac{\pi l}{2b} y, \quad \lambda_{kl} = \sqrt{\left(\frac{\pi k}{2a}\right)^2 + \left(\frac{\pi l}{2b}\right)^2}$$

Задовольняючи умову на вільну поверхню (третє рівняння в (3.9)), отримали

$$\lambda_{kl} \operatorname{sh} \lambda_{kl} H = \frac{\omega^2}{g} \operatorname{ch} \lambda_{kl} H.$$

З цього було знайдено вираз для власних частот рідини в призматичному резервуарі

$$\omega_{kl} = \sqrt{g \lambda_{kl} \tanh(\lambda_{kl} H)}.$$

Далі наведено вирази для перших 8 власних мод коливань рідини (вони ж є системою базисних функцій для розв'язання задачі про вимушені коливання).

$$\begin{aligned} \Psi_{01}(x) &= C_1 \cos(0 \cdot x) \sin \frac{\pi}{2b} y, \quad \Psi_{10}(x) = C_2 \sin \frac{\pi}{2a} x \cos(0 \cdot y), \\ \Psi_{11}(x) &= C_3 \sin \frac{\pi}{2a} x \sin \frac{\pi}{2b} y, \quad \Psi_{20}(x) = C_4 \cos \frac{\pi}{a} x \cos(0 y), \\ \Psi_{02}(x) &= C_5 \cos 0 x \cos \left(\frac{\pi}{b} y\right), \quad \Psi_{21}(x) = C_6 \cos \frac{\pi}{a} x \sin \frac{\pi}{2b} y, \\ \Psi_{12}(x) &= C_7 \sin \frac{\pi}{2a} x \cos \frac{\pi}{b} y, \quad \Psi_{22}(x) = C_8 \cos \frac{\pi}{a} x \cos \frac{\pi}{b} y \end{aligned} \quad (3.24)$$

У таблиці 3.2 наведено числові значення частот ω_{ij} і параметр частоти λ_{ij} для призматичного резервуара у формі куба з $a = b = H = 1$ м.

Таблиця 3.2

Власні частоти коливань рідини в призматичному резервуарі

n	i	j	λ_{ij}	ω_{ij}
1	0	1	1.772453851	4.051164194
2	1	0	1.772453851	4.051164194

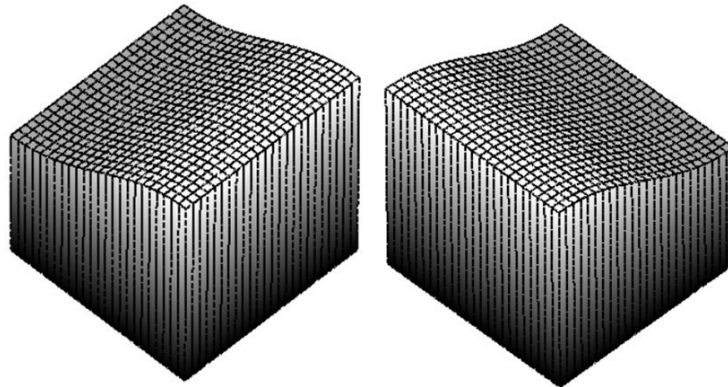
3	1	1	2.506628275	5.710012556
4	0	2	3.544907703	5.892165855
5	2	0	3.544907703	5.892165855
6	2	1	3.963327298	6.233151691
7	1	2	3.963327298	6.233151691
8	2	2	5.013256550	7.012538645

Для отримання виразу для функції ζ була використана наступна формула (3.14) для потенціалу швидкості. Залежність $n = n(i, j)$ було показано в таблиці 1, функції φ_n були визначені за формулами

$$\varphi_n = \frac{1}{ab} \frac{\cosh(\lambda_{ij}z)}{\cosh(\lambda_{ij}H)} \Psi_{ij}(x, y); \quad n = n(i, j), (3.25)$$

де Ψ_{ij} було знайдено з (3.24). Таким чином, висота вільної поверхні була виражена формулою (3.15), де основна функція φ_n ула визначена в (3.25).

Режими коливань вільної поверхні показані на рисунку 3.11.



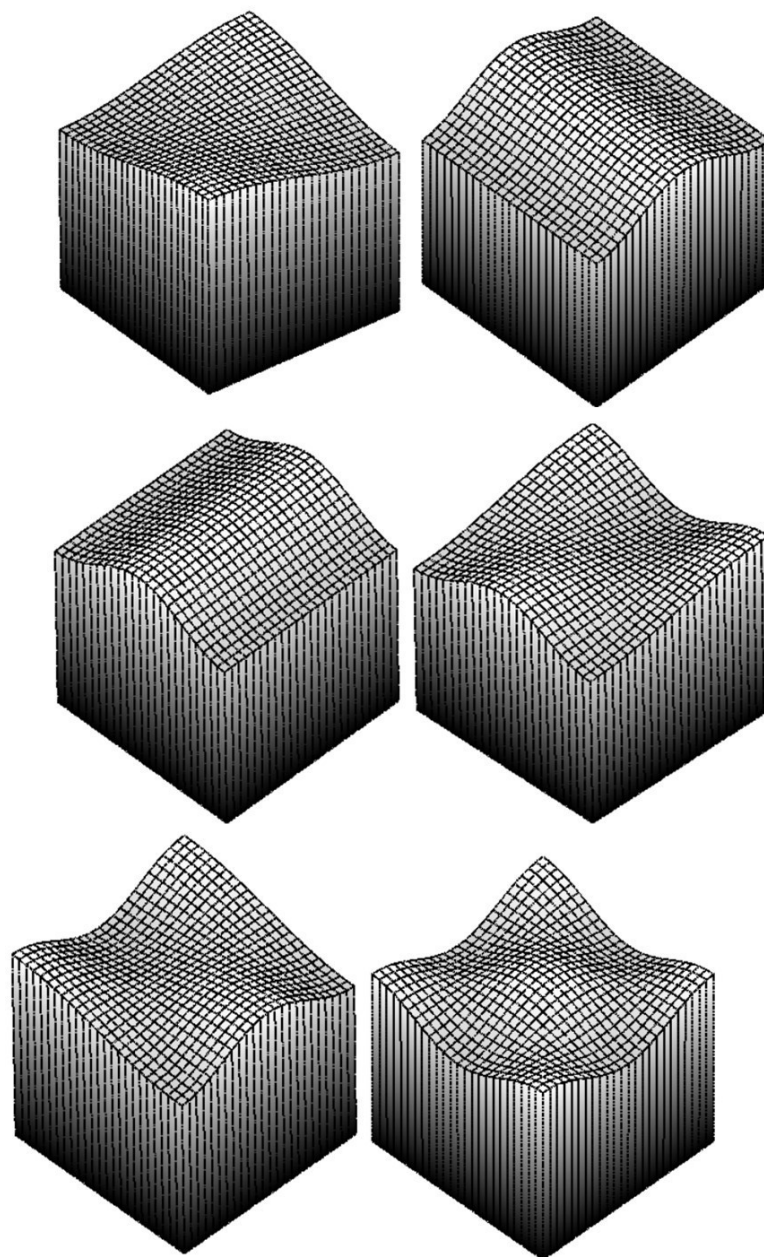


Рисунок 3.11 – Моді коливань вільної поверхні в призматичному баку

Таким чином, побудовано основну систему вимушеної вібрації рідини в жорстких призматичних резервуарах.

Вимушені колювання рідини при гармонічних навантаженнях

Припустимо, що в початковий момент часу рідина в призматичному резервуарі знаходиться в спокої. Резервуар піддається періодичним навантаженням $\cos \omega t$, які діють у горизонтальному напрямку (паралельно осі Ox , рисунок 3.12. Отримано систему

диференціальних рівнянь руху рідини, виходячи з наступної граничної умови на вільній поверхні:

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial t} + g\zeta(x, y) + x a_s(t) \right|_{z=H} = 0. \quad (3.26)$$

Підстановка виразів (3.24), (3.25) у співвідношення (3.27) призводить до

$$\sum_{k=1}^M \ddot{d}_k(t) \varphi_k(x, y, H) + g \sum_{k=1}^M d_k(t) \left. \frac{\partial \varphi_k(x, y, z)}{\partial z} \right|_{z=H} + x \cos \omega t = 0. \quad (3.27)$$

Тоді наступну систему диференціальних рівнянь було отримано шляхом скалярного добутку кореляції (3.27) на φ_n і використовуючи ортогональність режимів плескання:

$$\begin{aligned} \ddot{d}_1(t) + \omega_1^2 d_1(t) - \frac{8}{9\pi^2} \cos \omega t &= 0; \\ \ddot{d}_2(t) + \omega_2^2 d_2(t) + \frac{8}{25\pi^2} \cos \omega t &= 0; \\ \ddot{d}_3(t) + \omega_3^2 d_3(t) - \frac{8}{121\pi^2} \cos \omega t &= 0 \end{aligned} \quad (3.28)$$

Розв'язок системи (3.28) має такий вигляд:

$$\begin{aligned} d_1(t) &= \frac{8}{9\pi^2(\omega_1^2 - \omega^2)} (\cos \omega t - \cos \omega_1 t); \\ d_2(t) &= \frac{8}{25\pi^2(\omega_2^2 - \omega^2)} (\cos \omega t - \cos \omega_2 t); \\ d_3(t) &= \frac{8}{121\pi^2(\omega_3^2 - \omega^2)} (\cos \omega t - \cos \omega_3 t). \end{aligned} \quad (3.29)$$

Зміна висоти вільної поверхні в точці за часом ξ з координатами $x = 1, y = 1, z = 1$ протягом 10 с при $\omega = 1.1$ Гц показано на рисунку 3.11.

На рисунку 3.12 показано вплив частоти навантаження ω на перевищення рівня вільної поверхні.

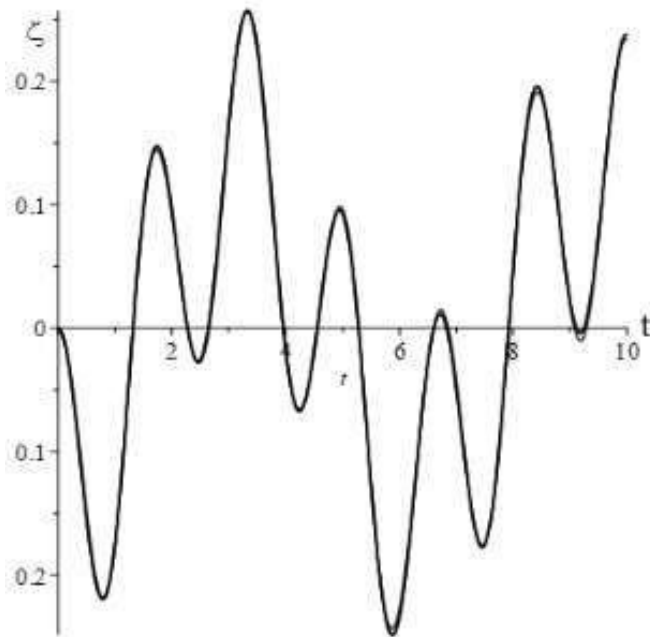


Рисунок 3.12 – Час зміни вільної поверхні через висоту

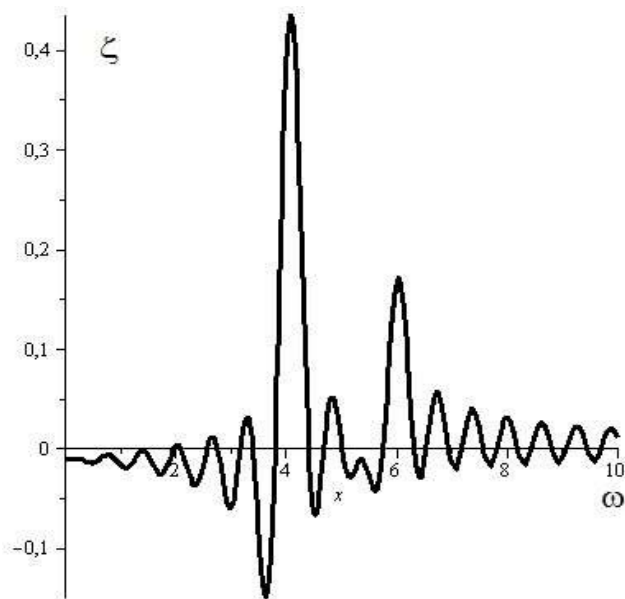


Рисунок 3.13 – Частоти навантажень від висоти вільної поверхні

Слід зазначити, що збіжність тут досягається при $M=3$.

Піки на графіку відповідають частотам ω_{10} та ω_{20} (таблиця 3.2). Ці частоти є найбільш небезпечними, наприклад, під час транспортування танка, що розглядається. Функція, що описує висоту вільної поверхні рідини, була отримана як

$$\zeta = \sum_{k=1}^M d_k(t) \frac{\partial \varphi_k(x, y, H)}{\partial z},$$

де коефіцієнти $d_k(t)$ були визначені за формулами (3.29).

Вимушені коливання рідини при імпульсних навантаженнях

Було розглянуто жорсткий призматичний резервуар, заповнений рідиною. Параметри бака наступні: $H = b = 1\text{ м}$ та $a = 1\text{ м}$ або $a = 2\text{ м}$. Тиск p на стінках бака за формулою (3.7). Тут $a_s(t)$ – функція, що характеризує зовнішній вплив (горизонтальний сейсм або імпульс).

Навантаження раптово прикладається до бічної поверхні призматичного бака $a_s(t) = Q_0 a(t)$, де $Q_0 = 1\text{ МПа}$ – розподілений тиск, та

$$a(t) = \begin{cases} 1, & t < T, \\ 0, & t \geq T. \end{cases} \quad (3.30)$$

Передбачається, що перед подачею горизонтального імпульсу танк перебував у стані спокою. Потім були розв'язані системи (3.30) при нульових початкових умовах. Для отримання розв'язку системи (3.30) застосовано оперативний метод¹⁷³.

Отримано наступні значення коефіцієнтів $d_k(t)$, $k = \overline{1, M}$:

$$\frac{d_k(t)}{Q_0} = \begin{cases} \frac{1}{\chi_k^2} - \frac{1}{\chi_k^2} \cos(\chi_k t) & 0 \leq t \leq T \\ \frac{1}{\chi_k^2} - \frac{1}{\chi_k^2} \cos(\chi_k t) - \frac{1}{\chi_k^2} + \frac{1}{\chi_k^2} \cos \chi_k(t - T) & t > T \end{cases}$$

На рисунку 3.14 висота вільної поверхні в точці $x=1, y=1, z=1$ залежно від часу, протягом якого було показано $T=1.5\text{ с}$.

¹⁷³ Guo Y., Iyer S. Regularity and expansion for steady Prandtl equations, Comm. Math. Phys. 2021. 382(3). P. 1403–1447 [220].

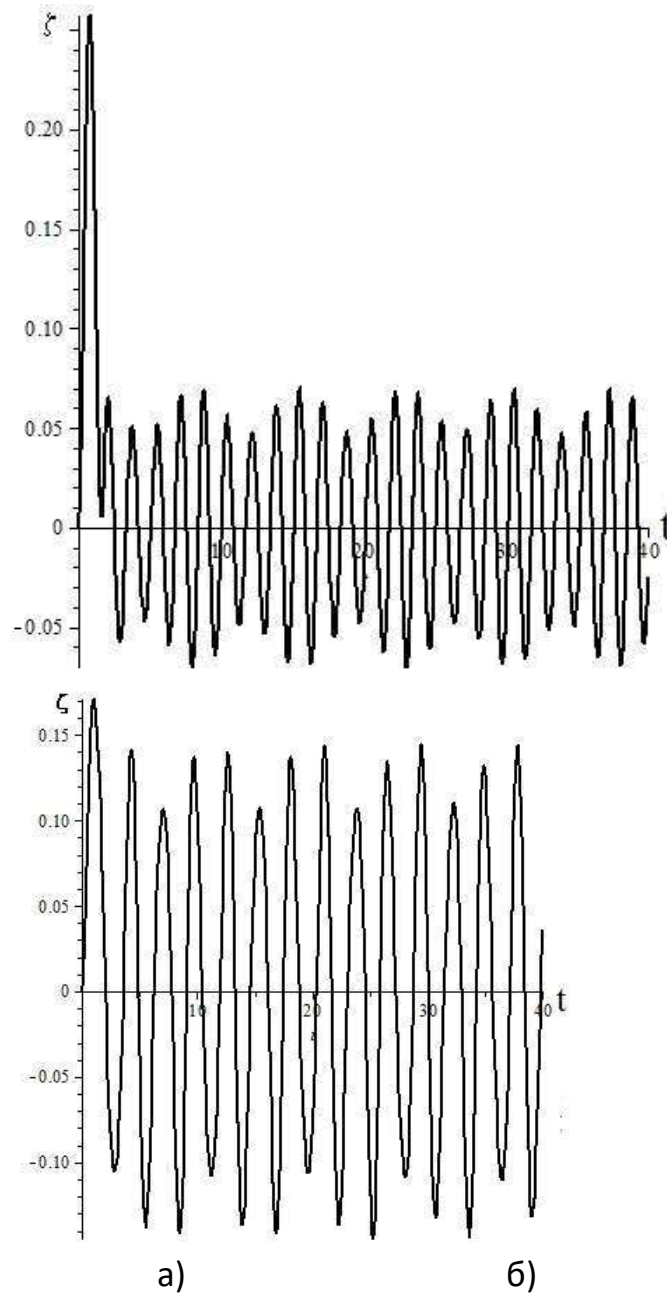


Рисунок 3.14 – Часові історії висоти вільної поверхні

Рисунок 3.14 а) і б) відповідають $a=1\text{м}$ і $a=2\text{м}$ відповідно, і це сторона призматичної ємності, уздовж якої було прикладено навантаження. Збільшення цієї сторони призводить до вирівнювання та пом'якшення амплітуд плескання

Розроблений метод дозволяє оцінити рівень підйому вільної поверхні в призматичних резервуарах при раптово виниклих навантаженнях. Розглянуто вільні та вимушені коливання рідини в призматичних баках рівної висоти. Розглянуто контрольні тести, які

підтвердили отримані результати. Враховано вплив відбійної установки та їх вплив на зміну висоти вільної поверхні.

Розроблений підхід дозволяє здійснити чисельне моделювання резервуарів з перегородками з перегородками різних розмірів і з різними положеннями в резервуарі. Це дає можливість керувати радіусом перегородки та її положенням у резервуарі. Це дуже актуально, тому що на практиці ефект від перегородок можна побачити, як правило, лише після встановлення перегородки. Запропонований метод дозволяє визначити придатне місце з належною висотою для встановлення перегородок у резервуарах за допомогою чисельного моделювання та таким чином скоротити дорогі польові експерименти.

Слід зазначити, що розглядається лише ідеальна нестислива рідина. Запропонований підхід можна застосувати до різних екологічно небезпечних рідин. Запропонований підхід легко узагальнити на пружні баки з пружними перегородками. Таким чином, майбутні дослідження стосуються вільних і вимушених коливань рідини в пружних резервуарах з пружними перегородками. Геометрію резервуара також можна легко змінити, тому результати будуть отримані для конічних, сферичних і складних корпусів з перегородками та без них. Це дозволить дати рекомендації щодо встановлення захисних елементів (кришок, перегородок). Це підвищить рівень екологічної безпеки територій, прилеглих до стаціонарних резервуарів з екологічно небезпечною рідиною. Також вдасться запобігти надзвичайним ситуаціям.

3.5. Коливання еолової рідини в конічних резервуарах з перегородками при вітровому навантаженні з нечіткими параметрами

Багато дослідницьких шкіл протягом кількох десятиліть були зосереджені на проблемах взаємодії рідини та структури. Нині цей інтерес зростає ще більше у зв'язку зі стрімким розвитком нових галузей промисловості, таких як атомне турбінобудування¹⁷⁴,

¹⁷⁴ Yatsyshyn T., Polutrenko M., Poberezhny L., Maruschak P., Martynyuk R. Assessment of factors of technogenic and environmental risks at particular stages of the life cycle of oil and gaswells. *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 36. P. 362-

вітроенергетика¹⁷⁵, аерокосмічна¹⁷⁶ та нафтохімія. Створення нових промислових зразків вимагає ретельного аналізу міцності та надійності обладнання. Хоча тільки повномасштабний експеримент може дати найбільш об'єктивні дані, його проведення пов'язане зі значними матеріальними труднощами і може призвести до розливу небезпечного вмісту, поломки дорогих зразків, а також завдати шкоди персоналу.

Таким чином, на перший план виходять методи комп'ютерного моделювання динамічних процесів. Серед них слід назвати методи скінченних елементів (МСЕ) і скінченних об'ємів, методи граничних елементів (МГЕ) підхід інтегральних рівнянь і перетворень.

Дуже важливе і цікаве застосування взаємодії рідини та структури стосується коливань заповнених рідиною структур з вільною поверхнею рідини¹⁷⁷. Чимало досліджень присвячено аналітичним і чисельним розв'язанням розплескування в циліндричних оболонках.

369. URL: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.047> [1].

¹⁷⁵ Tang L., Zhang M., Wen L. Support vector machine classification of seismic events in the Tianshan orogenic belt. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2020. 125. e2019JB018132. URL: <https://doi.org/10.1029/2019JB018132> [2].

¹⁷⁶ Kendzera O. V., Mykulyak S. V., Semenova Yu. V., Skurativska I. A., Skurativskiy S. I. Assessment of seismic response of a soil layer with the oscillating inclusions. *Geophysical journal*. 2020. Vol. 42 (4). P. 47–58 [3].

¹⁷⁷ Козуля Т. В., Емельянова Д. І. Екологічний ризик на різних рівнях дослідження природно-техногенних систем, інформаційне забезпечення його оцінки. *Проблеми інформаційних технологій*. 2015. № 17. С. 138–144 [257]; Матвійчук Н. М., Сидорук С. В. Формування системи індикаторів екологічної безпеки України. *Сталий розвиток економіки*. 2018. № 38. С. 113–119 [258]; Степанюк Г. С. Особливості функціонування та проблеми управління техногенно небезпечними нафтогазовими підприємствами. *Науково-інформаційний вісник. Економіка*. 2015. № 11. С. 259–266 [259]; Адаменко Я. О., Архипова Л. М. Екологічна оцінка гідроекосистем Битківського нафтопромислу. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2010. № 4. С. 136–143 [260]; Адаменко Я. О. Оцінка впливів техногенно небезпечних об'єктів на навколишнє середовище. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2010. № 2. С. 58–63 [261]; Клюк Б. О., Семчук Я. М. Моделювання забруднення довкілля методом збурень при відмові магістральних нафтопроводів. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2003. № 1(5). С. 94–95 [262]; Кривенко Г. М., Семчук Я. М., Возняк М. П., Возняк Л. В. Вплив чинників на технічний ризик у ході експлуатації нафтопроводів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2008. № 4. С. 108–111 [263]; Демченко П. М.,

Рудько Г. І. Основні екологічні проблеми нафтогазового комплексу України. Матеріали науково-практичної конференції «Екологічні проблеми нафтогазового комплексу». 2003. Т. 23. С. 27 [264]; Побережний Л. Я. Вплив аварій нафтогазопроводів на довкілля. *Екологія и промышленность*. 2007. № 3 (12). С. 20–24 [265]; Дригулич П. Г. Еколого-геологічний моніторинг забруднення довкілля об'єктами нафтогазового комплексу : автореф. дис. ... канд. геол. наук: спец. 21.06.01 "Екологічна безпека" ІваноФранків. нац. техн. ун-т нафти і газу. Івано-Франківськ, 2008. 19 с. [266]; Цайтлер М. Й. Заростання ділянок забруднених нафтопродуктами (на прикладі Бориславського нафтового родовища). *Дослідження, охорона та збагачення біорозмаїття*. Львів : УкрДЛТУ. 1999. С. 151–154 [267]; Бабаджанова О. Ф., Гринчишин Н. М., Сукач Ю. Г. Міграція нафти і нафтопродуктів у поверхневій шарі ґрунту при аварійних розливах. Безпека життя і діяльності людини – освіта, наука, практика: зб. 129 наук. праць X міжнар. наук.-метод. конф. Київ : Національний авіаційний університет. 2011. С. 22–26 [268]; Величко О., Терек О. Вплив нафтового забруднення ґрунту на вміст аскорбінової кислоти та активність аскорбатоксидази в органах рослин люцерни округлої. *Наук. вісн. ЛНАВМ ім. С. З. Гжицького*. 2008. Т. 10, № 3. Ч. 2. С. 144–148 [269]; Величко О. І. Вміст нітратного азоту в ґрунті та органах рослин сої за умов забруднення ґрунту нафтою. *Науковий вісник НЛТУ України: збірник науково-технічних праць*. Львів : РВВ НЛТУ України. 2011. Вип. 21.16. С. 351–354 [270]; Джура Н. М., Цвілінюк О. М., Терек О. І. Вплив нафтового забруднення на вміст макро- та мікроелементів у рослинах *Carex hirta* L. *Укр. ботан. журн.* 2007. Т. 64, # 1. № С. 122–131 [271]; Панасенко Є. В. Вплив вуглеводнів нафти на зміну деяких водних показників чорноземного ґрунту. *Вісник ХНАУ. Ґрунтознавство*. 2008. № 2. С. 132–135 [272]; Стецишин В., Градович М., Подан І., Гальчук Р., Джура Н., Шевчик Л., Романюк О. Вплив нафтового забруднення ґрунту на ріст рослин *Helianthus annuus* L., *Fagopyrum esculentum* Moench. і *Linum usitatissimum* L. Молодь і поступ біології: збірник тез XII міжнар. наук. конф. студентів і аспірантів (м. Львів, 19-21 квітня 2016 р.). Львів, 2016. С. 176–177 [273]; Терек О. І., Величко О. І., Джура Н. М. Фізіологічні аспекти адаптації рослин до нафтозабрудненого ґрунту. Фізіологія рослин: проблеми та перспективи розвитку: зб. наук. пр. Київ : Логос. 2009. Т. 1. С. 217–225 [274]; Шевчик Л. З., Жак Т. В., Романюк О. І., Джура Н. М., Подан І. І., Гальчук Р. І. Дослідження латеральної міграції нафтової плями за участю тестових рослин. Фундаментальні та прикладні дослідження в біології та екології. Матер. IV міжнар. наук. конф. (м. Вінниця, 12-14 квітня, 2016 р.). Вінниця : ДРУК. 2016. С. 146–147 [275]; Петренко О. В., Скрипник В. І. Вплив сейсмічних навантажень на резервуари зберігання рідких вуглеводнів. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*. 2022. № 12 (1242). С. 114–121 [276]; Кулик А. В., Ткаченко С. М. Підвищення сейсмостійкості резервуарів для зберігання нафти та продуктів її переробки. *Науковий вісник НТУУ "КПІ"*. 2023.

Слід зазначити, що підняті резервуари для води зазвичай схильні до змінного вітрового навантаження. Як амплітуди, так і частоти цього навантаження є невизначеними параметрами, які зазвичай знаходяться в певному інтервалі. Для адекватного опису процесу з такими параметрами були застосовані концепції нечіткої логіки¹⁷⁸.

Основною метою є розробка нових ефективних методів аналізу коливань рідини в конічних оболонках з перегородками та без них під дією еолових навантажень з нечіткими параметрами. Спочатку вібрації рідини в конічних оболонках вивчалися в чітких формулюваннях. Потім параметри навантаження були розмиті за допомогою трикутних нечітких чисел.

Отримано систему звичайних диференціальних рівнянь другого порядку з нечіткими параметрами та початковими даними.

Розглянуто V-подібну конічну оболонку (рисунок 3.15) з горизонтальною круговою перегородкою, частково заповнену рідиною.

№ 2 (108). С. 102–108 [277]; Зайцев Д. О., Скрипник О. Г. Розробка методів розрахунку сейсмостійкості резервуарів зрідженого природного газу. *Проблеми машинобудування*. 2023. № 2. С. 52–58 [278]; Басманов О. Є., Говаленков С. В., Горбенко М. О. Вплив випадкових чинників на спалахування резервуарів з нафтопродуктами. *Прикладна геометрія та інженерна графіка. Праці Таврійська державна агротехнічна академія*. Мелітополь : ТДАТА, 2004. Вип. 4. Т. 26. С. 24–28 [279]; Шугайло О-р П., Рижов Д. І. Загальні принципи оцінки сейсмічної міцності сталевих опорних конструкцій обладнання і трубопроводів атомних станцій відповідно до нормативних вимог. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2021. № 4(92). С. 4-11. URL: [https://doi.org/10.32918/nrs.2021.4\(92\).01](https://doi.org/10.32918/nrs.2021.4(92).01) [280]; Шугайло О-р П., Білик С. І. Вплив зміни технологічних умов експлуатації сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблоків атомних станцій на їх сейсмічну міцність. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2022. № 1(93). С. 62–70. URL: [https://doi.org/10.32918/nrs.2021.1\(93\).07](https://doi.org/10.32918/nrs.2021.1(93).07) [281]; Гарбуз С. В., Халмурадов Б. Д. Розрахунок можливих екологічно шкідливих викидів в атмосферу із резервуарів з залишками нафтопродуктів. *Матеріали XIII міжнародної науково-технічної конференції «Авіа-2017»*. Національний авіаційний університет м. Київ. 2017. С. 787–793 [282]; Пузік С. О., Островський Б. О., Комар Д. А. Методика розрахунку процесу примусової вентиляції резервуарів від залишків рідких 157 нафтопродуктів. *Вісник Національного авіаційного університету*. 2013. № 2. С. 109–113 [283].

¹⁷⁸ Sierikova O., Koloskov V., Degtyarev K., Strelnikova E. Improving the Mechanical Properties of Liquid Hydrocarbon Storage Tank Materials. *Materials Science Forum*. 2022. Vol. 1068. P. 223–229. DOI: 10.4028/p-888232 [202].

Нехай R_1 та R_2 – верхній і нижній радіуси оболонки, а $H=H_1+H_2$ це рівень наповнення. Передбачається, що перегородка розташована на висоті H_1 .

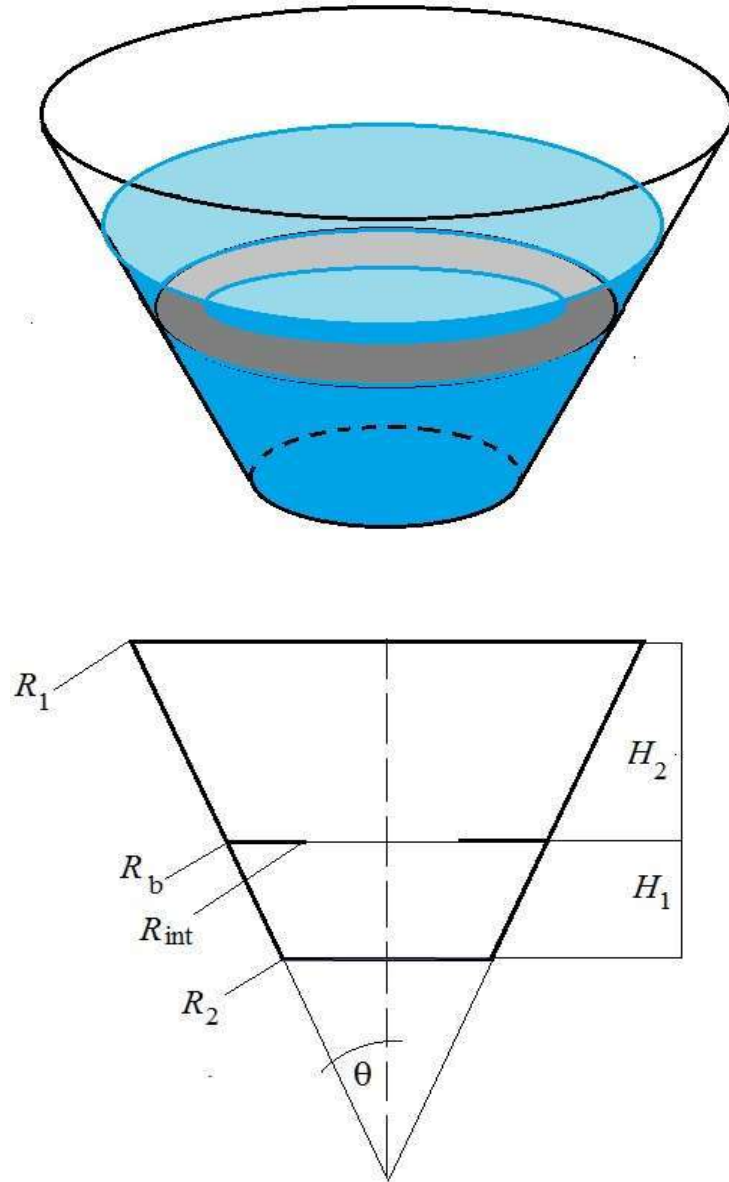


Рисунок 3.15 – Конічна оболонка з перегородками та її осадка

Рідина всередині оболонки вважалася ідеальною і нестисливою, а потік рідини за рахунок коливань оболонки – безобертальним. У цих припущеннях можна ввести потенціал швидкості φ можна було ввести, так що $\mathbf{V}=\text{grad}\varphi$, і через умову нестисливості суцільного середовища

$\operatorname{div} \mathbf{V} = \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0$ рівняння Лапласа для визначення φ було отримано таким чином:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0. \quad (3.31)$$

Тоді була отримана система керуючих рівнянь руху пружної оболонки з рідиною в операторній формі у вигляді¹⁷⁹.

$$\mathbf{L}\mathbf{U} + \mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} = \mathbf{P}_l + \mathbf{Q}, \quad (3.32)$$

де $\mathbf{L}$, $\mathbf{M}$ є операторами пружних і масових сил, $\mathbf{U} = (u_1, u_2, u_3)$ – вектор переміщення оболонки, $\mathbf{Q}(t)$ – зовнішнє поверхневе навантаження, $\mathbf{P}_l = (p - p_0)\mathbf{n}$ – тиск рідини, а $\mathbf{n}$ є зовнішньою нормою до поверхні. Значення тиску, згідно з інтегралом Бернуллі, можна представити наступним чином:

$$p - p_0 = -\rho_l \left[\frac{\partial \varphi}{\partial t} + a_x(t)x + a_z(t)z + gz \right]. \quad (3.33)$$

Тут ρ_l це щільність рідини, x та z – горизонтальна і вертикальна координати точки в рідині, g це гравітаційне прискорення, $a_x(t)$, $a_z(t)$ є прискореннями збуджуючої сили в горизонтальному і вертикальному напрямках, p_0 це атмосферний тиск. Відповідно до сформульовано наступну крайову задачу:

$$\begin{aligned} \mathbf{L}\mathbf{U} + \mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} = \mathbf{P}_l + \mathbf{Q}, \quad \nabla^2 \varphi = 0, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial n} = \frac{\partial w}{\partial t} \Big|_{S_1}, \quad w = (\mathbf{U}, \mathbf{n}), \\ \frac{\partial \varphi}{\partial n} = \dot{\zeta} \Big|_{S_0}, \quad p - p_0 \Big|_{S_0} = 0. \end{aligned} \quad (3.34)$$

для визначення невідомих функцій $\mathbf{U}$, φ , та $\zeta = \zeta(x, y, t)$ який описує рівень і положення вільної поверхні рідини. Тут S_1 – змочена поверхня оболонки, а S_0 це вільна поверхня рідини. Далі невідомі функції ζ та Φ можна виразити в циліндричних координатах (r, θ, z) наступним чином:

$$\zeta(r, \theta, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} d_{kj}(t) \cos(j\theta) \zeta_{kj}(r), \quad (3.35)$$

$$\varphi(r, \theta, z, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{j=0}^{\infty} \dot{d}_{kj}(t) \cos(j\theta) \varphi_{kj}(r, z). \quad (3.36)$$

¹⁷⁹ Nahorny V., Pigulevskiy P., Svystun V., Shumlianska L. To the question of verification of forecasting methods of earthquakes. *Extended Abstracts of XIV Int. Sci. Conf. «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment»*. (10–13 November 2020, Kyiv). 2020. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056080> [11].

Тут $d_{kj}(t)$ є невідомими залежними від часу коефіцієнтами для кожного хвильового числа j , основні функції $\zeta_{kj}(r)$ та $\varphi_{kj}(r, z)$ є розв'язками спектральної лінійної крайової задачі¹⁸⁰.

$$\nabla^2 \varphi_{kj} = 0, \frac{\partial \varphi_{kj}}{\partial n} = 0 \Big|_{S_1}, \frac{\partial \varphi_{kj}}{\partial n} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \Big|_{S_0}, \zeta_{kj}(r) = \frac{\partial \varphi_{kj}(r, z)}{\partial z} \Big|_{S_0} = \frac{\chi_{kj}^2}{g} \varphi_{kj}(r, H), \quad (3.37)$$

де χ_{kj}^2 є основними частотами плескання. Отже, для функції $\zeta(r, \theta, t)$ можна отримати:

$$\zeta(r, \theta, t) = \frac{1}{g} \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^m \cos(j\theta) \chi_{kj}^2 \varphi_{kj}(r, H) d_{kj}(t). \quad (3.38)$$

З використанням інтегрального представлення для невідомих потенціалів отримано систему сингулярних інтегральних рівнянь для кожної базової функції $\varphi_{kj}(r, z)$ або конічна оболонка без перегородок. Якщо були встановлені перегородки, то використовувався метод багатодоменого граничного елемента. Після отримання основних функцій $\zeta_{kj}(r)$ та $\varphi_{kj}(r, z)$ з відповідними основними частотами χ_{kj}^2 , побудовано наступну систему звичайних диференціальних рівнянь:

$$\ddot{d}_{0k}(t) + \chi_{0k}^2 (1 + a_z(t)/g) d_{0k}(t) = 0, \ddot{d}_{1k}(t) + \chi_{1k}^2 \left(1 + \frac{a_z(t)}{g}\right) d_{1k}(t) + a_x(t) F_{1k} = 0, \quad (3.39)$$

де $F_k = (r, \varphi_{1k}) / (\varphi_{1k}, \varphi_{1k})$, $k = \overline{1, M}$. Вихідними даними для імітаційної системи (5.39) є:

$$d_{0k}(t) = 0, \dot{d}_{0k}(t) = 0, d_{1k}(t) = 0, \dot{d}_{1l}(t) = q_1 \quad (3.40)$$

¹⁸⁰ Pihulevskyi P. G., Anisimova L. B., Kalinichenko O. O., Panteleeva N. B., Hanchuk O. V. Analysis of natural and technogenic factors on the seismicity of Kryvyi Rih. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1840(1), 012018. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1840/1/012018> [12]; Pihulevskyi P. H., Kendzera O. V., Babiy K. V., Anisimova L. B., Kyrlyuk O. S. Connection of Kryvbas tectonics with natural and technogenic seismicity. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. Vol. (2), P. 5–10 [13].

з ненульовими початковими швидкостями для деяких l . Прискорення $a_x(t)$ та $a_z(t)$ були представлені наступним чином $a_x(t) = a_0 \cos(f_0 t)$, $a_z(t) = a_1 \cos(f_0 t)$. Тут f_0 – приблизна частота вітрового навантаження. Таким чином, чітка задача визначення висоти вільної поверхні була зведена до системи (5.40) диференціальних рівнянь з граничними умовами (3.41) залежно від параметрів: $f_0, q_1, a_0, \bar{a}_1$, $\bar{a}_1 = a_1/g$. Проте детермінований аналіз не дав адекватної інформації при вивченні таких невизначеностей, як частоти та амплітуди коливань вітрових навантажень, а також можливості початкової ненульової швидкості вільної поверхні.

Фазифікація параметрів

Чіткі параметри $f_0, q_1, a_0, \bar{a}_1$ були розмиті як трикутні нечіткі числа $B = (b_1, b_2, b_3)$ використання неосесиметричних функцій належності $\mu_B(x)$ представлений на рисунку 3.16.

Функції членства $\mu_B(x)$ було визначено як:

$$\mu_B(x) = \begin{cases} (x - b_1)/(b_2 - b_1), & b_1 \leq x \leq b_2 \\ (b_3 - x)/(b_3 - b_2), & b_2 \leq x \leq b_3 \\ 0, & x < b_1, \quad x > b_3 \end{cases}$$

Чіткі інтервали B_α , визначається через α - операцію розділення, як в роботі Strelnikova E., Kriutchenko D., Gnitko V., Degtyarev K.¹⁸¹, були отримані відповідно:

$$B_\alpha = [b_1^{(\alpha)}, b_3^{(\alpha)}], b_1^{(\alpha)} = (b_2 - b_1)\alpha + b_1, b_3^{(\alpha)} = (b_3 - b_2)\alpha + b_2 \quad (3.41)$$

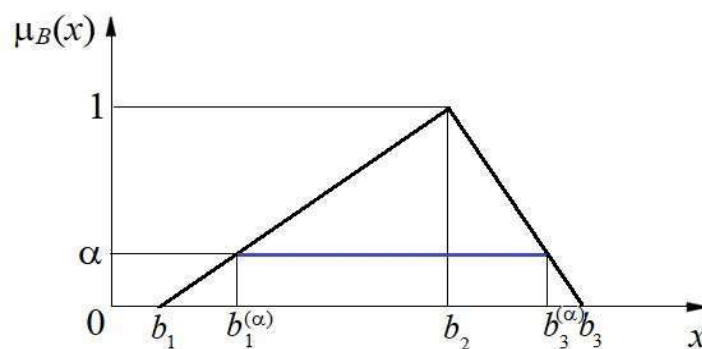


Рисунок 3.16 – Функція належності $\mu_B(x)$ та α -роздільні інтервали

¹⁸¹ Strelnikova E., Kriutchenko D., Gnitko V., Degtyarev K. Boundary element method in nonlinear sloshing analysis for shells of revolution under longitudinal excitations. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2020. Vol. 111. P. 78-87. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2019.10.008> [22].

Тоді всі чіткі параметри були розмиті як:

$$\begin{aligned} f_0 &\leftrightarrow F_0 = (f_{01}, f_{02}, f_{03}), & q_1 &\leftrightarrow Q_1 = (q_{11}, q_{12}, q_{13}), \\ a_0 &\leftrightarrow A_0 = (a_{01}, a_{02}, a_{03}), & \bar{a}_1 &\leftrightarrow A_1 = (a_{11}, a_{12}, a_{13}). \end{aligned}$$

Після фазифікації чисельний розв'язок системи (9) було отримано за допомогою методів. Так α - розділення інтервалів для функції ζ були отримані для різних α . Це дозволяє нам проаналізувати невизначеності, внесені вітровим навантаженням при оцінці рівня висоти вільної поверхні.

Чисельні результати та їх обговорення

Чіткий аналіз був проведений спочатку. У чисельному моделюванні V – вважається, що резервуар має конічну форму $R_1 = 1\text{м}$, $R_2 = 0.4\text{м}$, та $\theta = \pi/6$. Відповідне значення H можна легко знайти як $H = (R_1 - R_2) \cot \theta$. Були представлені результати чисельного моделювання хвильових чисел $j = 0, 1$ і різні положення перегородок, заявлені висотою H_1 у таблиці 3.3. Було залучено чотири власні значення для кожного j . Радіус конічної оболонки в положенні перегородки позначено як R_b , а радіус вільної поверхні як R_{int} (Рисунок 3.15).

По-перше, власні частоти були отримані для конічних баків без перешкод. Це відповідає цінностям $H_1 = H_2 = 0.5\text{м}$, $R_{\text{int}}/R_b = 1$. Значення H_1 та H_2 були обрані довільно, але $H_1 + H_2 = 1.0\text{м}$. Крім того, перегородки розглядалися з різних позицій, а саме $H_1 = 0.5\text{м}$ та $H_1 = 0.8\text{м}$ припускаючи різні розміри перегородок, $R_{\text{int}}/R_b = 0.5$ та $R_{\text{int}}/R_b = 0.2$. Слід також зазначити, що частоти першої гармоніки нижчі за осесиметричні для розглянутих конічних резервуарів.

Таблиця 3.3

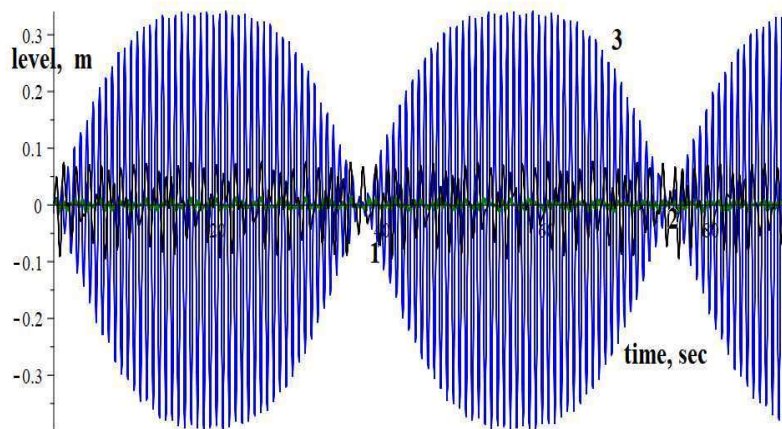
Власні частоти V-образних конічних баків з перегородками

n			1	2	3	4
H_1	H_2	R_{int}/R_b	$j = 0$			
0.5	0.5	1	3.4665	6.6819	9.8451	12.998
0.5	0.5	0.5	3.4088	6.6687	9.8433	12.998
0.5	0.5	0.2	3.4053	6.6354	9.8432	12.998
0.8	0.2	0.5	2.5271	6.3874	9.7242	12.921
0.8	0.2	0.2	2.4433	6.0590	9.5651	12.884
H_1	H_2	R_{int}/R_b	$j = 1$			
0.5	0.5	1	1.4164	4.9977	8.2065	11.377
0.5	0.5	0.5	1.2284	4.9747	8.1974	11.376

0.5	0.5	0.2	1.1722	4.9436	8.1963	11.376
0.8	0.2	0.5	0.8155	4.7425	8.0039	11.205
0.8	0.2	0.2	0.6306	4.1916	7.8497	11.203

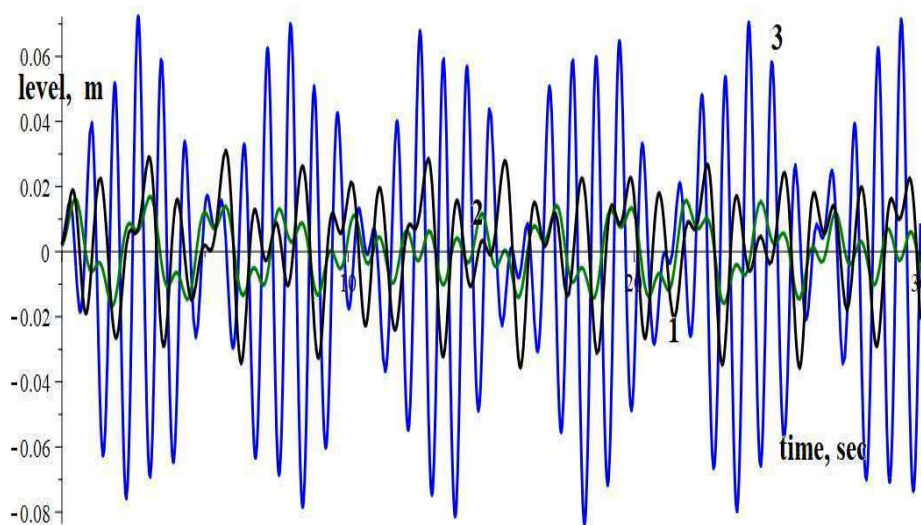
Згідно з дослідженнями Sierikova O., Strelnikova E., Gnitko V., Degtyarev K.¹⁸² найбільш характерною частотою вітрового навантаження є $f_0=0.07$ Гц, а його діапазон становить $f_0 \in (0.025, 2.5)$ Гц. Отже, трикутне нечітке число можна ввести наступним чином $F_0 = (0.025, 0.07, 2.5)$. Зверніть увагу, що частоти, наведені в табл. 1, знаходяться в інтервалі для f_0 в $n=1$, $j=0,1$ і тому система (9) буде включати диференціальні рівняння, в яких фігурують ці частоти. Наступні презентації також реалізовано для нечітких параметрів: $A_0 = (0.01, 0.1, 0.2)$, $A_1 = (0.01, 0.05, 0.2)$, $Q_1 = (0.01, 0.05, 0.075)$.

Нижче були розглянуті інтервали α -розрізів для всіх нечітких параметрів, а також оцінено нижню та верхню межі α -розрізів для висоти вільної поверхні рідини. Рисунки 3.16 а)-б) демонструють як чіткі рішення, так і нижню та верхню межі α -розрізів для функції ζ через час для різних α .



а) $\alpha=0.25$

¹⁸² Sierikova O., Strelnikova E., Gnitko V., Degtyarev K. Boundary Calculation Models for Elastic Properties Clarification of Three-dimensional Nanocomposites Based on the Combination of Finite and Boundary Element Methods. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2021. P. 351-356, DOI: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570086 [23]; Gnitko V., Marchenko U., Naumenko V., Strelnikova E. Forced vibrations of tanks partially filled with the liquid under seismic load. *WIT Transaction on Modelling and Simulation*. 2011. Vol. 52. P. 285-296. URL: <https://doi.org/10.2495/BE110251> [24].



б) $\alpha=0.75$

Рисунок 3.16 – Нижня та верхня межі α -розрізів для функції ζ протягом часу

Цифра 2 на цих малюнках відповідає чітким розчинам, цифрами 1 і 3 позначені нижня і верхня межі α -зрізів. З отриманих результатів видно, що при достатньо великому α виникають малі коливання вільної поверхні: найбільша амплітуда досягає 0,3 м на верхній межі α -зрізів при $\alpha=0,25$.

Таким чином, за наявними вихідними даними Sun Y., Zhou D., Wang J.¹⁸³ та результатами цього дослідження можна зробити наступний висновок. Процес заповнення паливного бака при вітровому навантаженні стабільний для α -розрізів 0,75 і вище. Але з ймовірністю, близькою до 0,25, можливі режими биття, рисунок 3.16 а). Це може статися при екстремальних значеннях нечітких змінних. Так, під час заправки паливного бака необхідний постійний контроль вітрового навантаження з тимчасовим припиненням заправки при збільшенні прискорення вітрового навантаження. Також необхідно використовувати захисні покриття та інші демпфери.

Дія вітрового навантаження та, як результат, коливання еолової рідини в паливних баках є процесом з багатьма невизначеностями. Для математичного моделювання таких явищ необхідні концепції нечіткої

¹⁸³ Sun Y., Zhou D., Wang J. An equivalent mechanical model for fluid sloshing in a rigid cylindrical tank equipped with a rigid annular baffle. *Applied Mathematical Modelling*. 2019. Vol. 72. P. 569–587 [200].

логіки з реалізацією нечітких диференціальних рівнянь. У цьому дослідженні запропоновано ефективний чисельний метод опису збурення вільної від рідини поверхні в контейнері під дією вітрового навантаження з використанням концепцій нечіткої логіки. Проведено чисельне моделювання α -розрізів для висоти вільної поверхні. Визначено інтервали небезпечних частот і прискорень вітрового навантаження. Це дозволяє надати практичні рекомендації щодо процесу заправки паливного бака. В подальшому можливе встановлення та дослідження впливу перегородок і плаваючих кришок, інших демпферних пристроїв на рівень підйому вільної поверхні під дією вітрового навантаження, використовуючи концепції нечіткої логіки та нелінійні формулювання¹⁸⁴.

¹⁸⁴Sun Y., Zhou D., Wang J. An equivalent mechanical model for fluid sloshing in a rigid cylindrical tank equipped with a rigid annular baffle. *Applied Mathematical Modelling*. 2019. Vol. 72. P. 569–587 [200]; Zhou D., Wang J. D., Liu W. Q. Nonlinear sloshing of liquid in rigid cylindrical container with a rigid annular baffle: free vibration. *Nonlinear Dynamics*. 2014. Vol. 78(4), P. 2557–2576 [201]; Sierikova O., Koloskov V., Degtyarev K., Strelnikova E. Improving the Mechanical Properties of Liquid Hydrocarbon Storage Tank Materials. *Materials Science Forum*. 2022. Vol. 1068. P. 223–229. DOI: 10.4028/p-888232 [202]; Kushch V. I. Stress field and effective elastic moduli of periodic spheroidal particle composite with Gurtin-Murdoch interface. *International Journal of Engineering Science*. 2018. Vol. 132. P. 79–96. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2018.08.001> [203]; Gnitko V., Degtyariev K., Naumenko V., Strelnikova E. BEM and FEM analysis of the fluidstructure interaction in tanks with baffles, *Int. Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. 2017. Vol. 5 (3). P. 317–328. URL: <https://doi.org/10.2495/CMEM-V5-N3-317-328> [204]; Shugaylo O., Bilyk S. The Specifics of the Compilation of the Calculated Load Combinations in the Assessment of Seismic Resistance of Steel Supporting Structures of Nuclear Power Plant Equipment and Piping *J. of Mech. Eng.* 2022. Vol. 25 (3). P. 6-15. URL: <https://doi.org/10.15407/pmach2022.03.006> [205]; Серікова О. М., Стрельнікова О. О., Пісня Л. А., Крютченко Д. В. Дослідження впливу пікових амплітуд сейсмічного прискорення при землетрусі на техногенні об'єкти. Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: зб. наук. статей XVI Міжнародної науково-практичної конференції УКРНДІЕП (м. Харків, 14–18 вер. 2020 р.). 2020. С. 221–223 [206]; Серікова О. М., Стрельнікова О. О., Пісня Л. А., Крютченко Д. В. Вплив сейсмічних навантажень на резервуари для збереження отруйних та легкозаймистих рідин. Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: зб. наук. статей XVI Міжнародної науково-практичної конференції УКРНДІЕП (м.

Харків, 14–18 вер. 2020 р.). 2020. С. 217–220 [207]; Yadav R., Tirumali M., Wang X., Naebe M, Kandasubramanian B. Polymer composite for antistatic application in aerospace. *Defence Technology*. 2020. Vol. 16. Is. 1. P. 107–118. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.04.008> [208]; Pramanik S., Hazarika J., Kumar A., Karak N. Castor oil based hyperbranched poly (ester amide) polyaniline nanofiber nanocomposites as antistatic materials. *Ind Eng Chem Res*. 2013. Vol. 52 (16). P. 5700–5707 [209]; Baur J., Silverman E. Challenges and Opportunities in multifunctional nanocomposite structures for aerospace applications. *MRS Bull*. 2007. 32. P. 28–34 [210]; Горових О. Г., Оразбаєв А. Р. Механізм електризації вуглеводневої рідини при заповненні нею резервуарів вертикального типу. *Надзвичайні ситуації: освіта і наука*. 2014. Т. 9. № 2. С. 16–22 [211]; Горових О. Г., Оразбаєв А. Р. Визначення енергії розряду статичної електрики з падаючої краплею нафтопродукту. Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення боєздатності оперативно-рятувальних підрозділів: Зб. тез. матеріалів Всеукр. наук.-практ. конф. (Харків, 21 берез. 2013 р.). НУЦЗ України. 2013. С. 286–288 [212]. Huang J. C. Carbon black filled conducting polymers and polymer blends. *Adv Polym Technol: J Polym Proc Inst*. 2002. 21. P. 299–313 [213]; Ravati S., Favis B. D. Low percolation threshold conductive device derived from a fivecomponent polymer blend. *Polymer*. 2010. V. 51. P. 3669–3684 [214]; Гібридний електропровідний плівковий нанокомпозит для електромагнітного та електростатичного захисту: пат. 99185 Україна: Н05К 9/00, МПК (2015.01). № у 2014 12311, заяв. 17.11.2014; опубл. 25.05.2015, Бюл. № 10. 5 с. [215].

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА МЕТОДУ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РЕЗЕРВУАРІВ В УМОВАХ ПІДВИЩЕННЯ СЕЙСМІЧНОЇ АКТИВНОСТІ

4.1. Розробка методики оцінки параметрів землетрусів

Було розглянуто циліндричну оболонку з радіусом $R=1$ м та рівнем заповнення $h=2$ м під дією горизонтального сейсмічного навантаження з різними параметрами. Результати розрахунків наведено на рисунку 4.1 а, б.

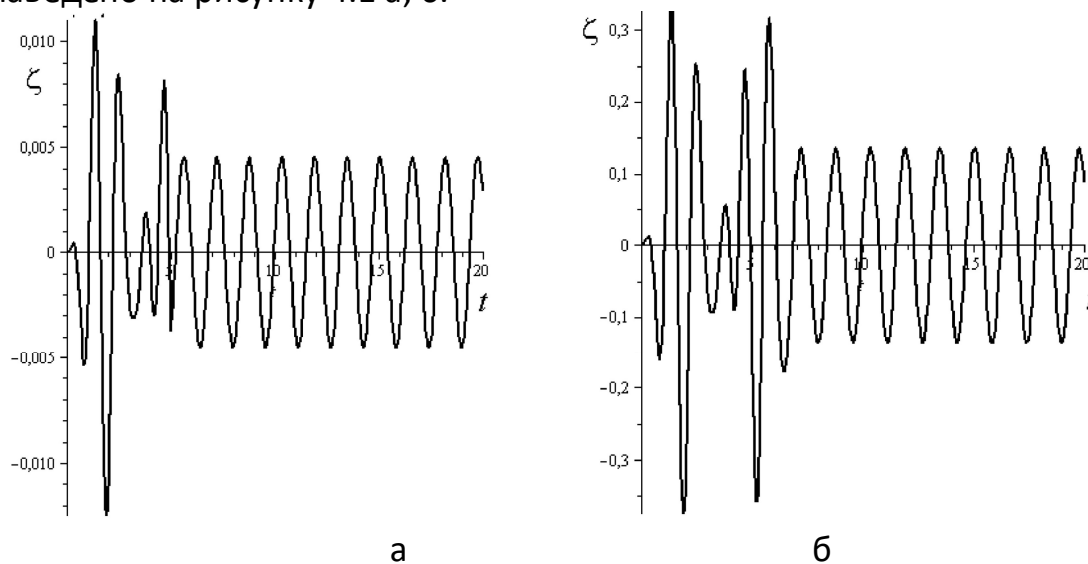


Рисунок 4.1 – Зміна рівня підйому вільної поверхні під дією сейсмічних навантажень

На рисунку 4.1 а) показано зміну рівня вільної поверхні під дією сейсмічного навантаження з такими параметрами: $M=4$ бали, $r=200$ м, $S=20$ с, $\omega=4$ Гц. Рисунок 4.1 б) демонструє зміну рівня вільної поверхні під дією сейсмічного навантаження з параметрами: $M=8$ балів, $r=800$ м, $S=20$ с, $\omega=4$ Гц.

Ці дані можуть бути корисними при оцінюванні стійкості резервуарів під дією сейсмічних навантажень.

Результати досліджень дозволять зробити підбір параметрів резервуарів для відстроювання від небажаних частот, попередити їх руйнування та продовжити строк експлуатації, що дозволить підвищити рівень екологічної безпеки прилеглих до резервуарів територій¹⁸⁵.

4.2. Реалізація методів нечіткої логіки

Поглиблене розуміння невизначеностей сейсмічної небезпеки пов'язане з використанням концепції інтервальної ймовірності. У цьому підході розподіл можливостей застосовувався для визначення менших і вищих ймовірностей (міри необхідності та можливості). Цей підхід використовувався в аналізі сейсмічної небезпеки. Природним розширенням інтервальної ймовірності є концепція нечіткої ймовірності. Концепції нечіткого параметра та нечіткої логіки були вперше запропоновані Заде, і з того часу вони стали потужним інструментом для моделювання невизначеностей різноманітних практичних інженерних задач¹⁸⁶.

¹⁸⁵ Gnitko V., Degtyariev K., Naumenko V., Strelnikova E. BEM and FEM analysis of the fluidstructure interaction in tanks with baffles, *Int. Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. 2017. Vol. 5 (3). P. 317–328. URL: <https://doi.org/10.2495/CMEM-V5-N3-317-328> [204].

¹⁸⁶ Липовий В. О., Удянський М. М. Техногенні ризики забруднення довкілля під час експлуатування та ремонтних робіт резервуарів з нафтопродуктами. Харків : НУГЗУ. 2017. 107 с. [150]; Medvedovskaya T., Strelnikova E., Medvedyeva K. Free hydroelastic vibrations of hydroturbine head covers. *Int. J. Eng. and Advanced Research Technology*. 2015. Vol. 1. № 1. P. 45–50 [151]; Серікова О. М., Стрельнікова О. О., Крютченко Д. В. Оцінка сили сейсмічних навантажень на резервуари для збереження отруйних та легкозаймистих рідин. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*. 2021. Вип. 51. С. 70–80. URL: <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2021-51-08> [152]; Gnitko V., Degtyariev K., Karaiev A., Strelnikova E., Multi-domain boundary element method for axisymmetric problems in potential theory and linear isotropic elasticity, *WIT Transactions on Engineering Sciences*. WIT Press. 2019. P. 13–25. URL: <https://doi.org/10.2495/BE410021> [153]; Strelnikova E., Kriutchenko D., Gnitko V., Degtyarev K. Boundary element method in nonlinear sloshing analysis for shells of revolution under longitudinal excitations. *Engineering Analysis with Boundary*

Elements. 2020. Vol. 111. P. 78-87. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2019.10.008> [154]; Degtyariov K., Gnitko V., Kononenko Y., Kriutchenko D., Sierikova O., Strelnikova E. Fuzzy Methods for Modelling Earthquake Induced Sloshing in Rigid Reservoirs. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology* (KhPIWeek). 2022. P. 297-302. URL: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916466> [155]; Gnitko V., Degtyariov K., Naumenko V., Strelnikova E. BEM and FEM analysis of the fluidstructure interaction in tanks with baffles, *Int. Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. 2017. Vol. 5 (3). P. 317–328. URL: <https://doi.org/10.2495/CMEM-V5-N3-317-328> [156]; Zheng Jh., Xue M. A., Dou P., et al. A review on liquid sloshing hydrodynamics. *J Hydrodyn*. 2021. Vol. 33. P. 1089–1104. URL: <https://doi.org/10.1007/s42241-022-0111-7> [157]; Raynovskyy I. A., Timokha A. N. Sloshing in Upright Circular Containers: Theory, Analytical Solutions, and Applications. CRC Press/Taylor & Francis Group. 2020. 170 p. [158]; Nahornyi V. V., Shevchenko A. V., Lyashchuk V. I., et al. Hydrogeodeformation monitoring as a tool for earthquake prediction in the Dnieper-Krivoy Rog aulacogen. *Journal of Geodynamics*. 2020. Vol. 136. P. 101718 [159]; Венгерський П. С. Чисельне моделювання руху поверхневих і ґрунтових потоків та їх взаємодія на території водозбору : автореф. дис. ... д-ра фіз.-мат. наук : 01.05.02. Львів, 2017 [160]; Li Y., Zhang G., Wang H., et al. Monitoring of groundwater level changes and its relationship with tectonic activities in the North China Plain. *Engineering Geology*. 2023. Vol. 282. P. 106135 [161]; Jing H., Chen H., Yang J., Li P. Shaking table tests on a small-scale steel cylindrical silo model in different filling conditions. *Structures*. 2022. Vol. 37. P. 698–708 [162]; Mansour S., Pieraccini L., Palermo M., Foti D., Gasparini G., Trombetti T., Silvestri S. Comprehensive Review on the Dynamic and Seismic Behavior of Flat-Bottom Cylindrical Silos Filled with Granular Material. *Front. Built Environ*. 2022. 7. 805014 [163]; Про затвердження Правил пожежної безпеки в Україні НАКАЗ МВС України № 1417 від 30.12.2014 (редакція від 03.10.2017 р.) URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15/paran19> [164]; ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги», затверджений наказом Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 04.11.2016 № 297 [165]; ВБН В.2.2-58.1-94 Проектування складів нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа. Зі Зміною № 1 (затвердженою наказом Держнафтогазпрому України від 24.12.1999 № 136а) [166]; Soriano C., Tarazona S. F., Almeida M.C.F., Almeida M.S.S., Borges R. G. Selection of earthquake ground motion accelerograms for the continental margin of Southeastern Brazil. *DYNA*. 2021. Vol. 88 (217). P. 228-236 [167]; Ravnik J., Strelnikova E., Gnitko V., Degtyarev K., Ogorodnyk U. BEM and FEM analysis of fluid–structure interaction in a double tank. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2016. Vol. 67. P. 13-25. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2016.02.006> [168]; Sivanandam S. N.,

Фактично, розподіли ймовірностей ніколи не можна вважати відомими. Вони завжди припускались, як гіпотетичні, і дані спостережень, оброблені статистичними методами, включаючи методи розширеної вибірки та моделювання. Можна перевірити, наскільки правильними були припущення щодо розподілу. Слід зазначити, що для такого математичного моделювання необхідно використовувати нечіткі диференціальні рівняння. Нечіткі підходи не можуть замінити ймовірнісні моделі в дослідженнях сейсмічного ризику, але вони можуть збагатити їх і розширити сферу їх застосування.

Відповідно до¹⁸⁷ штучна акселерограма, застосована для чисельного моделювання коливань рідини в жорсткому циліндричному резервуарі. Сейсмічна реакція була оцінена з використанням як детермінованого, так і нечіткого підходу.

Оцінка висоти вільної поверхні при сейсмічних навантаженнях детермінованим методом

Оцінка сейсмічної міцності виглядає наступним чином. На першому етапі за методикою, розробленою Soriano C., Tarazona S. F., Almeida M.C.F., Almeida M.S.S., Borges R. G.¹⁸⁸ визначено модальні інерційні сейсмічні навантаження на конструкцію в поперечному та поздовжньому напрямках.

Аналіз експериментальних досліджень сейсмостійкості¹⁸⁹ показали, що зазвичай єдина перша власна частота знаходиться в зоні сейсмічного резонансу. Більш високі власні частоти значно відрізняються від зони сейсмічного резонансу. Зазвичай друга власна частота вище верхньої межі спектра сейсмічного навантаження.

Було виявлено, що нижчі частоти наповненого рідиною резервуара є частотою плескання. Розділено спектри коливань вільної

Sumathi S., Deepa S. N. Introduction to Fuzzy Logic Using MATLAB, Springer, Berlin Heidelberg. 2007 [169]; Avramov K.V. Nonlinear modes of parametric vibrations and their applications to beams dynamics, *Journal of Sound and Vibration*. 2009. Vol. 322. P. 476–489. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.07.013> [170].

¹⁸⁷ Soriano C., Tarazona S. F., Almeida M.C.F., Almeida M.S.S., Borges R. G. Selection of earthquake ground motion accelerograms for the continental margin of Southeastern Brazil. *DYNA*. 2021. Vol. 88 (217). P. 228-236 [167].

¹⁸⁸ Там само [167].

¹⁸⁹ Там само [167].

поверхні та пружних стінок¹⁹⁰. Досліджено вимушені коливання пласта при сейсмічних навантаженнях. Для визначення амплітуди прискорення, що відповідає даній силі землетрусу, було використано таблицю 3.1¹⁹¹.

Для землетрусу силою 6 балів отримано прискорення 0,05 g.

В таблиці 4.1 представлено рівень прискорення залежно від сейсмічної інтенсивності.

У таблиці 4.2 наведені нижні частоти коливань вільної поверхні та стінок бака¹⁹².

Таблиця 4.1

Рівень прискорення залежно від сейсмічної інтенсивності

Сейсмічна інтенсивність, магнітуда	5	6	7	8	9
Максимальний рівень прискорення (в частках g)	0.025	0.05	0.1	0.2	0.4

Таблиця 4.2

Нижчі частоти вібрації системи бак-рідина

Номер частоти	Частота, Гц	Хвильове число	Тип вібрації
1	0.6418	1	плескання
2	0.9739	0	плескання
3	1.1509	1	плескання
4	1.3208	0	плескання
5	1.4564	1	плескання
6	1.5909	0	плескання
7	1.7054	1	плескання
8	1.9212	1	плескання
9	2.0249	0	плескання
10	7.6591	0	вібрація днища

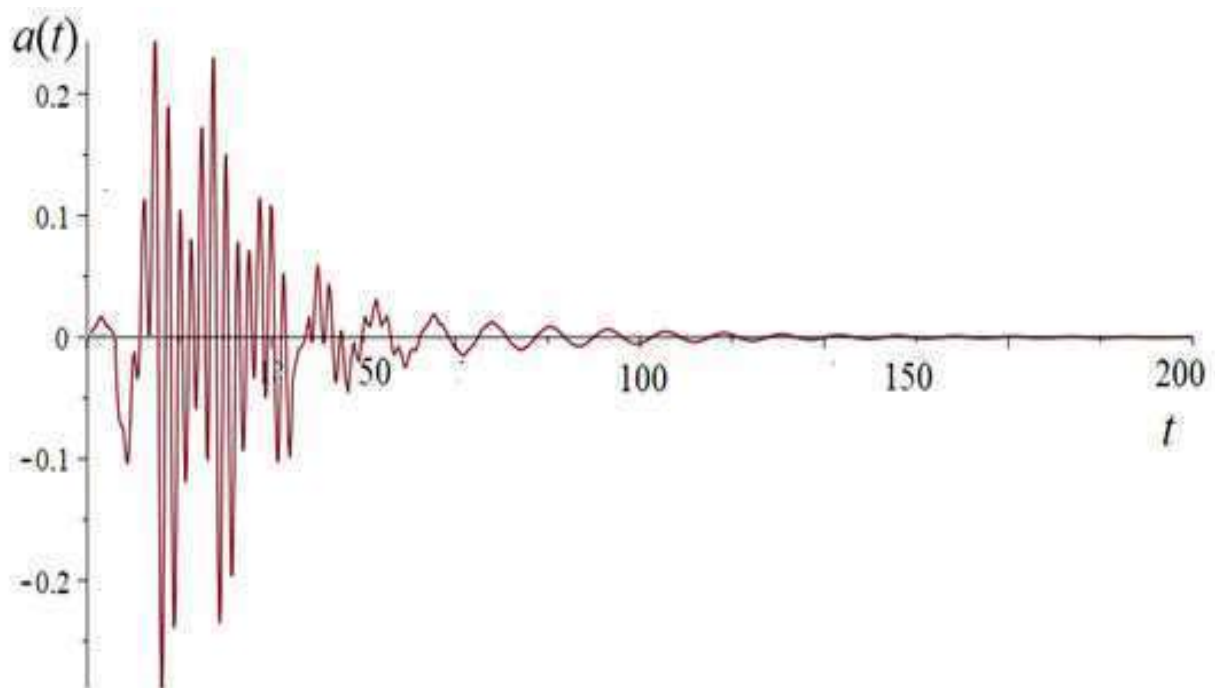
¹⁹⁰ Там само [167].

¹⁹¹ Там само [167].

¹⁹² Ravnik J., Strelnikova E., Gnitko V., Degtyarev K., Ogorodnyk U. BEM and FEM analysis of fluid–structure interaction in a double tank. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2016. Vol. 67. P. 13-25. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2016.02.006> [168].

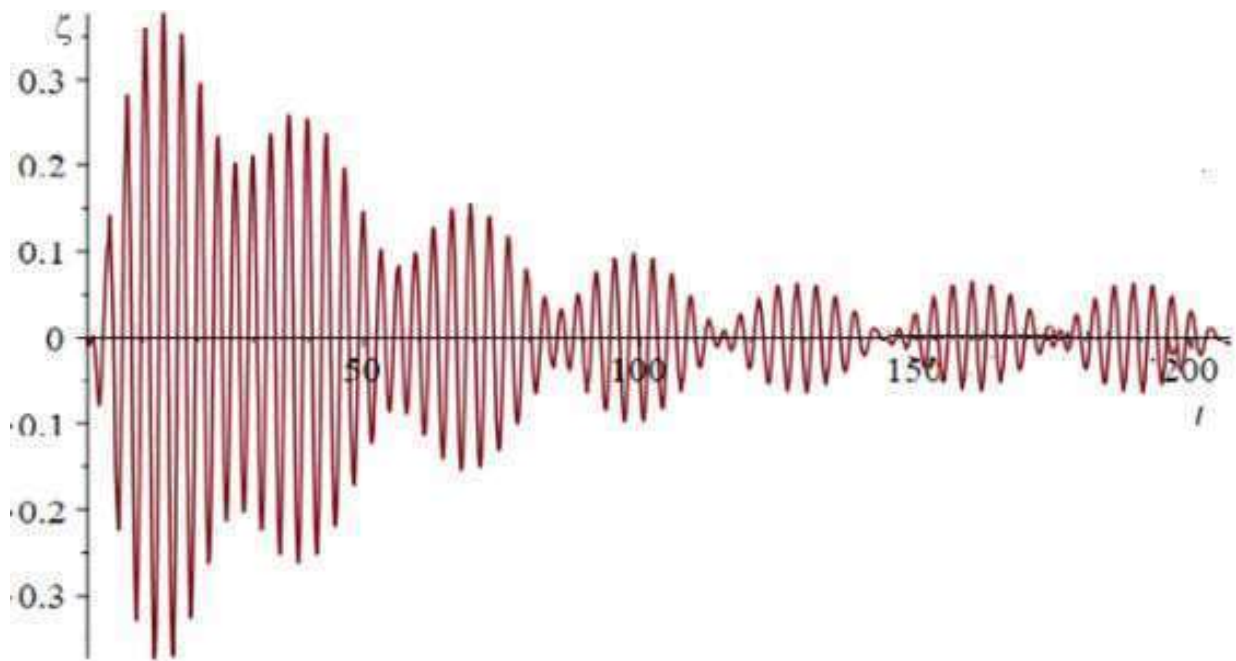
Для чисельного моделювання резервуар для зберігання рідин був змодельований циліндричною оболонкою з такими параметрами: рівень наповнення $H = 1\text{м}$, радіус оболонки $R = 1\text{м}$, товщина оболонки $h = 0.01\text{м}$, Модуль Юнга $E = 2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$, Коефіцієнт Пуассона $\nu = 0.3$, щільність матеріалу оболонки $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$, щільність рідини $\rho_0 = 1000 \text{ кг/м}^3$. Передбачається, що оболонка жорстко прикріплена до свого контуру. Характерна частота сейсмічного навантаження при землетрусі магнітудою 6 дорівнює 2 Гц.

Тут побудована штучна акселерограма відповідно¹⁹³, і показано на рисунку 4.2. а). Потім система звичайних диференціальних рівнянь (22) з граничними умовами (23) розв'язується чисельно в лінійній постановці. Часова історія підйому вільної поверхні протягом перших 240 секунд землетрусу була продемонстрована на рисунку 4.2. б).

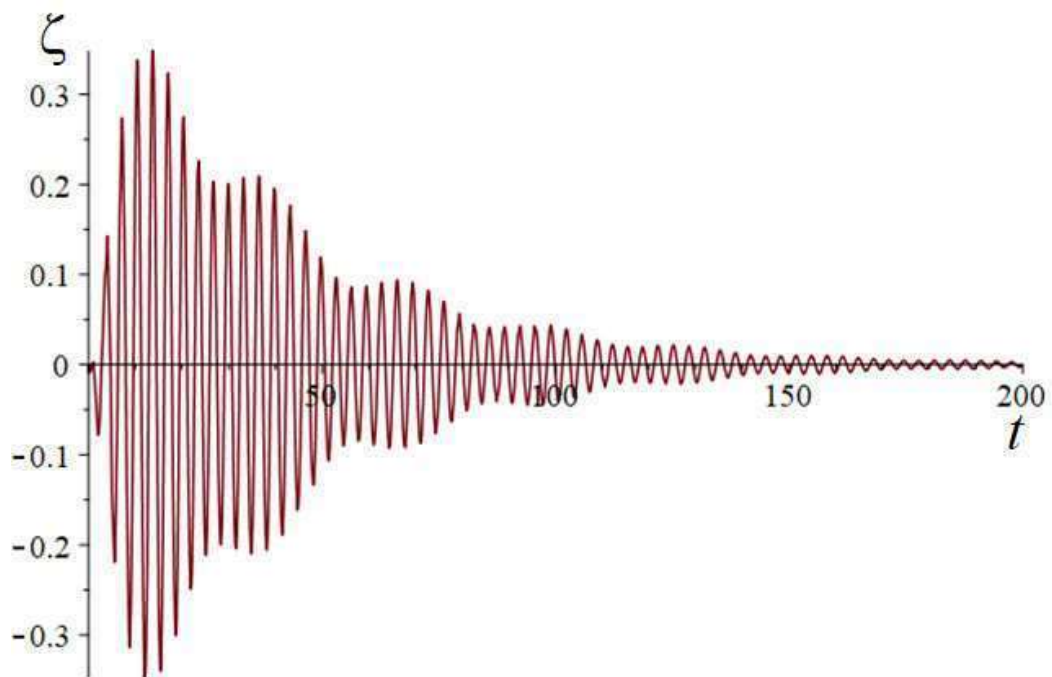


a)

¹⁹³ Soriano C., Tarazona S. F., Almeida M.C.F., Almeida M.S.S., Borges R. G. Selection of earthquake ground motion accelerograms for the continental margin of Southeastern Brazil. *DYNA*. 2021. Vol. 88 (217). P. 228-236 [167].



б)



в)

Рисунок 4.2 – Акселерограма та часові історії підйому вільної поверхні

Для порівняння результатів використано нелінійну постановку та розв'язано систему (25) з граничними умовами (26). Часова історія підйому вільної поверхні протягом 240 с продемонстрована на рисунку

4.2 в). У дослідженні передбачалося, що горизонтальні та вертикальні компоненти сейсмічного збудження були описані подібним чином, як показано на рисунку 4.2 а).

Слід зазначити, що в точці розраховано перевищення вільної поверхні в часі $\rho = 1, \theta = 0, z = \zeta(\rho, \theta)$ в циліндричній системі координат.

Система диференціальних рівнянь у лінійній формулюванні включала 9 рівнянь, що відповідають першим 9 частотам, наведеним у Таблиці 4.2. Наведені дані свідчать про розділення частотних спектрів коливань рідини та коливань пружних стінок, при цьому найнижча частота коливань стінок не близька до характерної частоти сейсмічних навантажень при землетрусі магнітудою 6. Отже, прийнято обмежитися розглядом жорстких резервуарів. Однак у кожному конкретному випадку потрібен ретельний модальний аналіз.

Висота вільної поверхні пласта також була оцінена в нелінійному формулюванні (25)-(26). Хоча результати, що відповідають лінійним і нелінійним формулюванням, близькі, нелінійний аналіз призводить до зменшення амплітуд коливань, тоді як лінійний аналіз виявляє періодичні незатухаючі коливання з малими амплітудами. Затухання коливань у нелінійному аналізі виникає через наявність у диференціальних рівняннях похідних першого порядку за часом. Отже, нелінійний аналіз дає більш адекватні результати.

Нечіткі методи в оцінці висот вільної поверхні при сейсмічних навантаженнях

Тут детерміновані вхідні значення пікових наземних прискорень $a_h = a_v = c = 0.2$ були фазифіковані за допомогою трикутних симетричних функцій належності $\mu(a_h)$ та $\mu(a_v)$, визначається (27), з $a = 0.066$. Детерміновані методи показують, що максимальне підняття вільної поверхні відбувається в перші 30 с після початку землетрусу. Протягом цього періоду висоти вільної поверхні, розраховані за допомогою як лінійних, так і нелінійних формулювань, дуже близькі, тому для фазифікації тут і далі можна використовувати диференціальні рівняння (22) з граничними умовами (23). Оскільки максимальні амплітуди спостерігаються протягом перших 30 с, розв'язки нечітких диференціальних рівнянь були отримані саме протягом цього періоду.

Підхід MATLAB Simulink використовувався для вирішення нечітких диференціальних рівнянь¹⁹⁴. Рисунок 4.3 демонструє часові

¹⁹⁴ Sivanandam S. N., Sumathi S., Deepa S. N. Introduction to Fuzzy Logic

історії висот вільної поверхні, отримані шляхом розв'язання нечітких диференціальних рівнянь. Числа 1 і 3 пов'язані з мінімальними (синя лінія) і максимальними (червона лінія) значеннями нечітких параметрів. Чіткий графік висоти вільної поверхні позначено цифрою 3. Таким чином, використання нечіткого підходу дозволяє оцінити можливість розливу небезпечного вмісту.

Слід зазначити, що чіткі значення висот вільної поверхні рідини розташовані між верхньою та нижньою межами нечітких пікових прискорень землі.

Запропоновано підхід на основі методу граничних елементів для дослідження підйому вільної поверхні рідини в жорстких колекторах в умовах сейсмічних збуджень. Землетрус характеризується поздовжніми та поперечними навантаженнями з нечіткими акселерограмами. Отримано системи звичайних диференціальних рівнянь для чіткого опису висоти вільної поверхні в жорстких резервуарах з використанням лінійних і нелінійних формулювань.

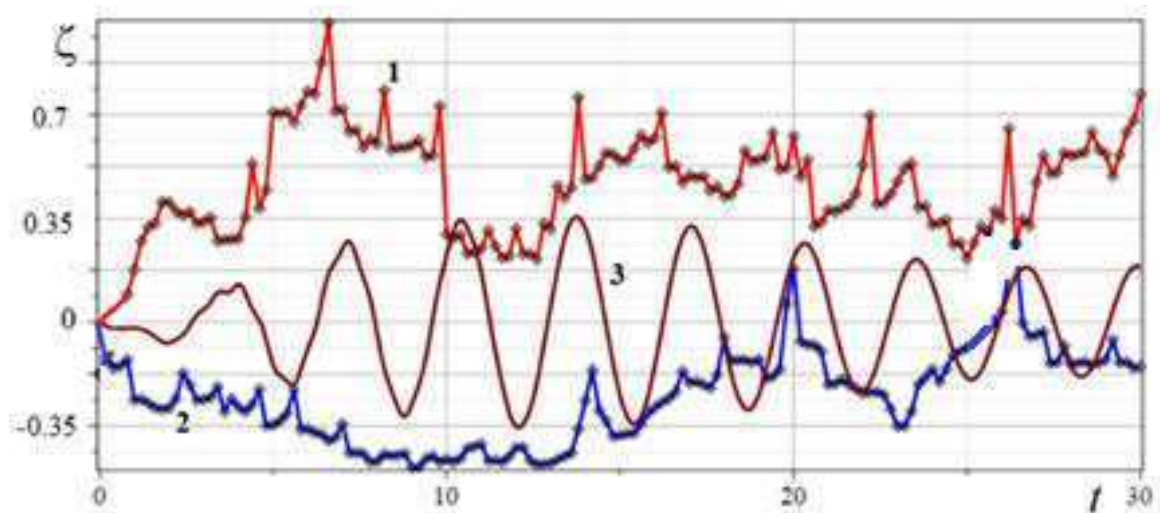


Рисунок 4.3 – Нечіткі часові історії висоти вільної поверхні

Результати показують, що використання нелінійного підходу призводить до спадання процесу в часі, тоді як лінійне формулювання описує вібраційний процес з малими амплітудами, близькими до періодичних. Синтетична акселерограма, яка використовується для детерміністичного аналізу плескання, викликаного землетрусом. При цьому максимальні амплітуди коливань досягаються в перші 30 секунд від початку землетрусу, коли різниця між результатами в лінійній і нелінійній постановках невелика.

Це дозволяє розглядати лінійну постановку в цей період. Пікові прискорення землі в горизонтальному та вертикальному напрямках були розмиті за допомогою трикутних симетричних функцій належності. Отримані системи нечітких диференціальних рівнянь розв'язували чисельно за допомогою підходу MATLAB Simulink.

Для проведення розрахунків вібраційних характеристик проводимо такі розрахунки¹⁹⁵. Спочатку обчислюємо частоти та форми коливань пружної незаповненої оболонки. Розглянуто сталеву оболонку із закріпленням по всьому днищу.

4.3. Методика визначення динамічних характеристик оболонкових конструкцій

На Рис 4.4. зображені форми коливань такої незаповненої пружної оболонки.

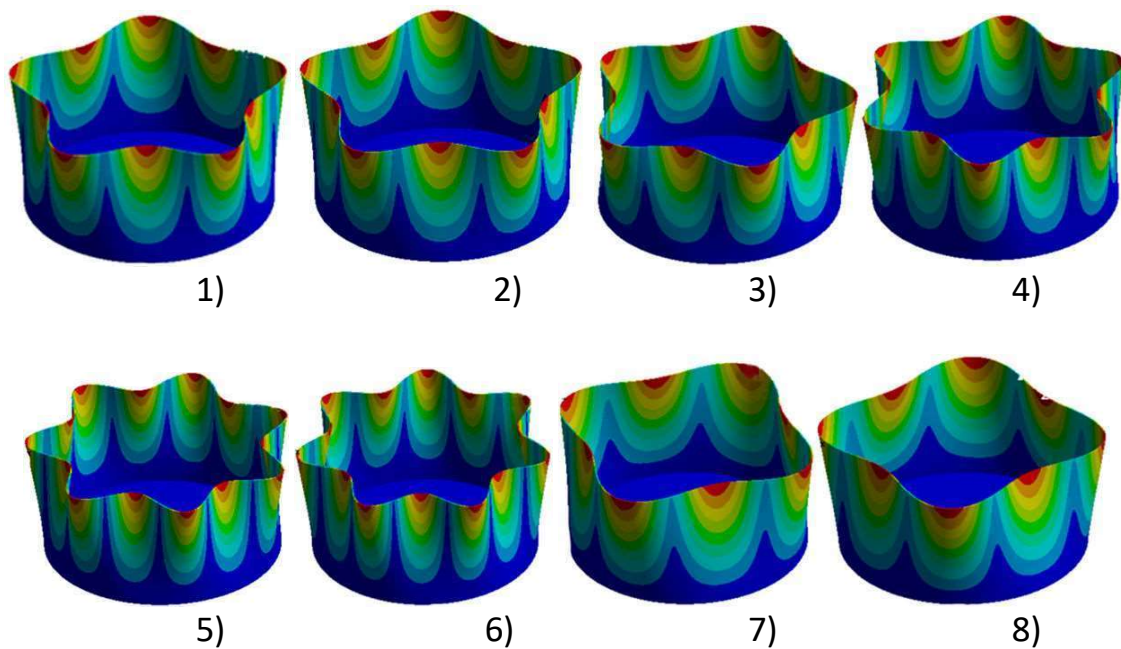


Рисунок 4.4. Форми коливань незаповненої пружної оболонки.

¹⁹⁵ Smetankina N., Kravchenko I., Merculov V., Ivchenko D., Malykhina A. Modelling of bird strike on an aircraft glazing. In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Kritskiy, D. (eds) *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, Cham. 2020. Vol. 1113. P. 289–297. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5_25 [37].

В таблиці 4.3 наведені відповідні частоти коливань.

Таблиця 4.3

Частоти коливань незаповненої оболонки

N форми	1	2	3	4	5	6	7	8
Частота коливань Гц	109.07	109.07	110.63	110.63	129.95	129.95	132.15	132.15

Зауважимо, що всі частоти коливань є кратними, їм відповідають різні форми коливань. Ці форми, як показано в¹⁹⁶, складають першу систему базисних функцій для проведення динамічного аналізу.

Далі розглянуті плескання нафти в зазначеному вище резервуарі. Густина нафти дорівнює 960 кг/м^3 , швидкість звуку 1250 м/с , рівень заповнення оболонки нафтою 1 м .

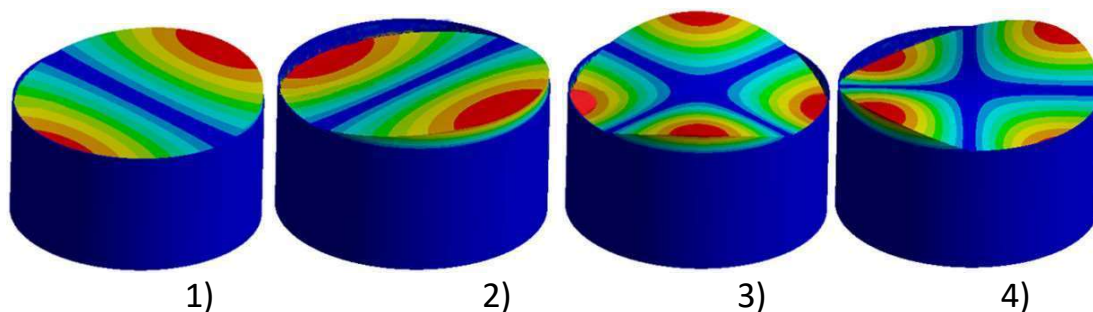
В таблиці 4.4 наведені частоти плескань нафти в оболонці. При цьому оболонка вважалась жорсткою.

Таблиця 4.4

Частоти плескань, Гц

N форми	1	2	3	4	5	6	7	8
Частота коливань, Гц	0.6596	0.6596	0.8693	0.8693	0.9754	1.021	1.021	1.149

На рисунку 4.5. наведені форми плескань вільної поверхні.



¹⁹⁶ Там само [37].

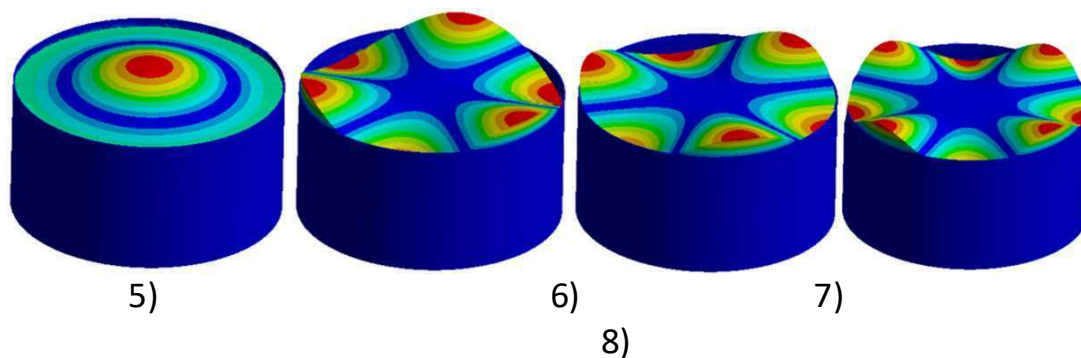


Рисунок 4.5 – Форми плескань вільної поверхні

Бачимо, що найнижчі частоти відповідають неосесиметричним формам, а саме першій гармоніці. Осесиметрична форма відповідає п'ятій частоті.

Далі виконано аналіз частот коливань з врахуванням пружності стінок. В Таблиці 4.5. наведено частоти коливань пружної оболонки з врахуванням приєднаних мас рідини.

Таблиця 4.5

Частоти коливань пружної заповненої оболонки, Гц

N форми	1	2	3	4	5	6	7	8
Частота коливань, Гц	73.741	77.242	95.203	105.08	113.45	115.82	120.59	122.35

Відповідні форми коливань стінок показані на рисунку 4.6.

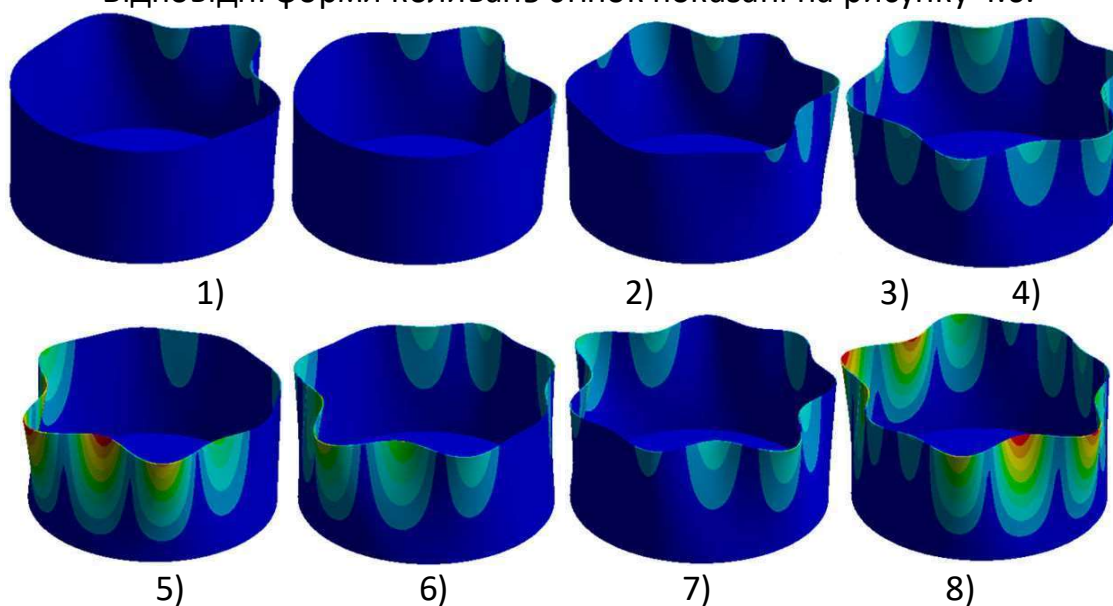


Рисунок 4.6 – Форми коливань стінок заповненої пружної оболонки

Врахування пружності стінок баків приводить до істотного зниження частот коливань в порівнянні з частотами незаповнених оболонок, при цьому найменші частоти заповнених і незаповнених оболонкових конструкцій можуть відповідати різним хвильовим числам

Таким чином, розроблено методику визначення динамічних характеристик оболонкових конструкцій, що виготовлені із сталі, та частково заповнені рідиною (нафтопродуктами). Здійснено числовий аналіз динамічних характеристик для моделі резервуарів для збереження рідких вуглеводнів. Визначено оптимальні параметри оболонкових конструкцій для зменшення їх деформацій під час коливання рідини (на прикладі рідких вуглеводнів).

Подовження строку експлуатації резервуарів, збереження їх герметичності і стійкості при різних впливах природного і техногенного походження, попередження витоків, розливів та пожежної небезпеки є необхідним для підвищення рівня екологічної безпеки прилеглих територій¹⁹⁷.

Далі в роботі розглянуто коливання пружної сталеві оболонки з тими ж геометричними та фізичними характеристиками, але із закріпленням по ребру-контурі днища.

Вважалось, що висота типової оболонки дорівнювала $L = 1.0$ м, її радіус складав $R = 1$ м, а товщина $h = 0.01$ м; оболонки заповнювались рідиною (нафта) на рівень $H = 1.0$ м. Розглядались оболонки із жорстко закріпленим днищем по всій площині та лише по його контуру, при дослідженні плескань враховувались гравітаційні сили з прискоренням

¹⁹⁷ Smetankina N., Kravchenko I., Merculov V., Ivchenko D., Malykhina A. Modelling of bird strike on an aircraft glazing. In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Kritskiy, D. (eds) *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, Cham. 2020. Vol. 1113. P. 289–297. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5_25 [37]; Avramov K.V. Nonlinear modes of parametric vibrations and their applications to beams dynamics, *Journal of Sound and Vibration*. 2009. Vol. 322. P. 476–489. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.07.013> [170]; Kovalov A., Otrosh Y., Rybka E., Kovalevska T., Togobytska V., Rolin I. Treatment of Determination Method for Strength Characteristics of Reinforcing Steel by Using Thread Cutting Method after Temperature Influence. In *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd. 2020. Vol. 1006. P. 179–184 [198]; Surianinov M., Andronov V., Otrosh Y., Makovkina T., Vasiukov S. Concrete and fiber concrete impact strength. *Materials Science Forum*. 2020. 1006 MSF. P. 101–106 [199].

$g = 9,812 \text{ м/с}^2$. Густина нафти дорівнює 960 кг/м^3 , швидкість звуку 1250 м/с .

В таблиці 4.6 наведені частоти незаповненої пружної оболонки.

Таблиця 4.6

Частоти коливань незаповненої оболонки, закріпленої за контуром днища

N форми	1	2	3	4	5	6	7	8
Частота коливань, Гц	23.403	48.562	48.566	79.925	79.932	91.25	106.21	106.24

Бачимо, що частоти коливань днища стають домінантними, суттєво меншими за частоти коливань оболонки з повністю закріпленням днищем.

На рисунку 4.7 показані відповідні форми коливань пружного днища незаповненої оболонки

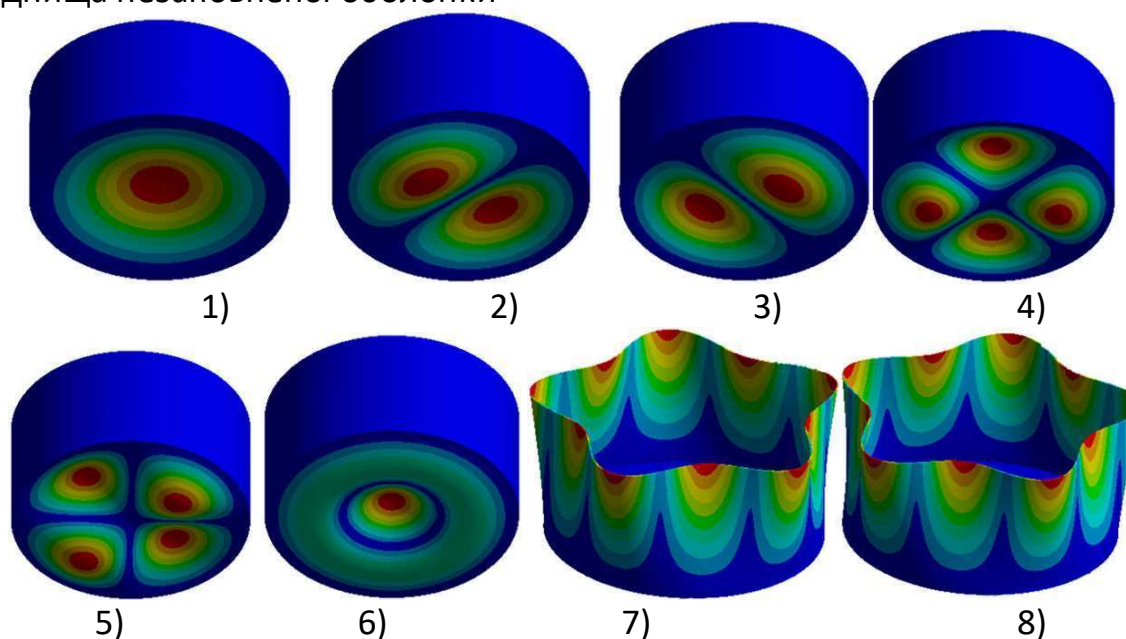


Рисунок 4.7 – Форми коливань незаповненої оболонки, закріпленої за контуром днища

Відносно частот плескань зауважимо, що дані повністю співпадають з отриманими вище для оболонки з повністю закріпленням днищем.

Врахування пружності стінок приводить до таких результатів. Частоти коливань наведені в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7

Частоти коливань заповненої оболонки, закріпленої за контуром днища

N форми	1	2	3	4	5	6	7	8
Частота коливань, Гц	15.138	34.375	42.806	62.981	63.828	71.722	75.360	78.391

На рисунку 4.8 наведені відповідні форми коливань.

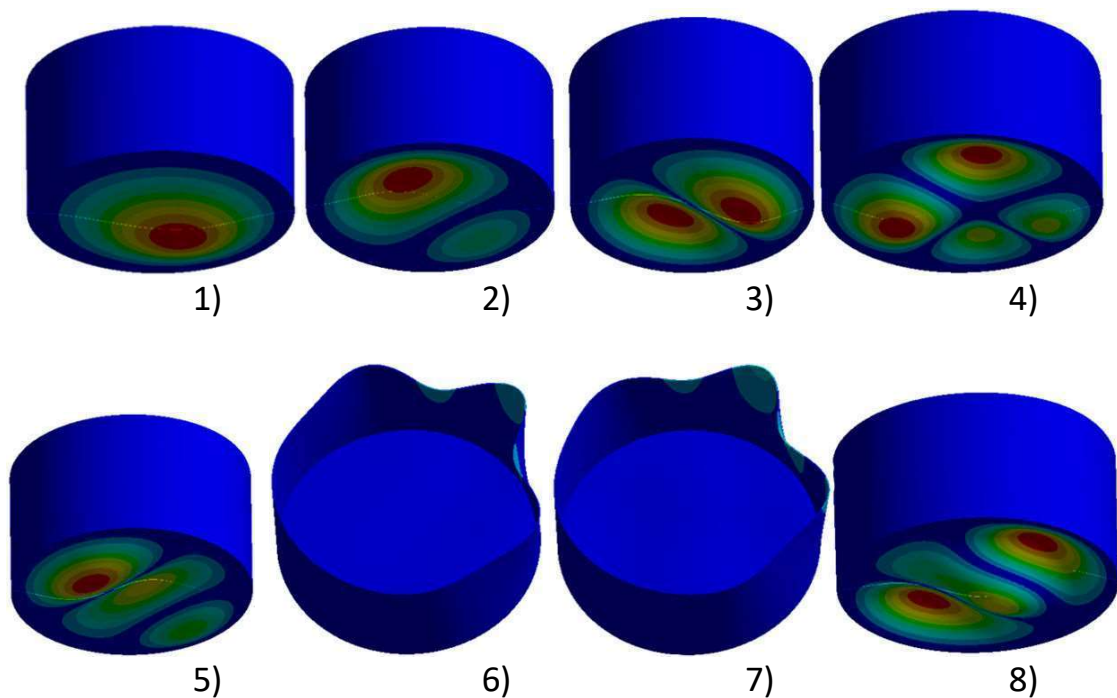


Рисунок 4.8 – Форми коливань пружного днища заповненої оболонки

Як і очікувалось врахування пружності стінок зменшує частоту власних коливань в оболонці з закріпленням по контуру днищем проте майже не змінює власні форми.

Далі вивчено вплив товщини оболонки на частоти коливань пружних поверхонь.

Розглянуто сталеву пружну оболонку з тими ж механічними та геометричними характеристиками, але зі значно меншою товщиною днища та стінок $h = 0,0015\text{м}$.

В таблиці 4.8 наведені частоти коливань незаповненої оболонки з повністю закріпленим днищем.

Таблиця 4.8

Частоти коливань заповненої оболонки з повністю закріпленим днищем

N форми	1	2	3	4	5	6	7	8
Частота коливань, Гц	43.85	43.864	45.328	45.351	46.272	46.287	49.709	49.735

Бачимо, що зменшення товщини оболонки веде й до зменшення її власних частот, також при зменшенні товщини оболонки першими формами становляться форми ще більш високої гармоніки. На рисунку 4.9 зображені відповідні форми коливань пружних стінок.

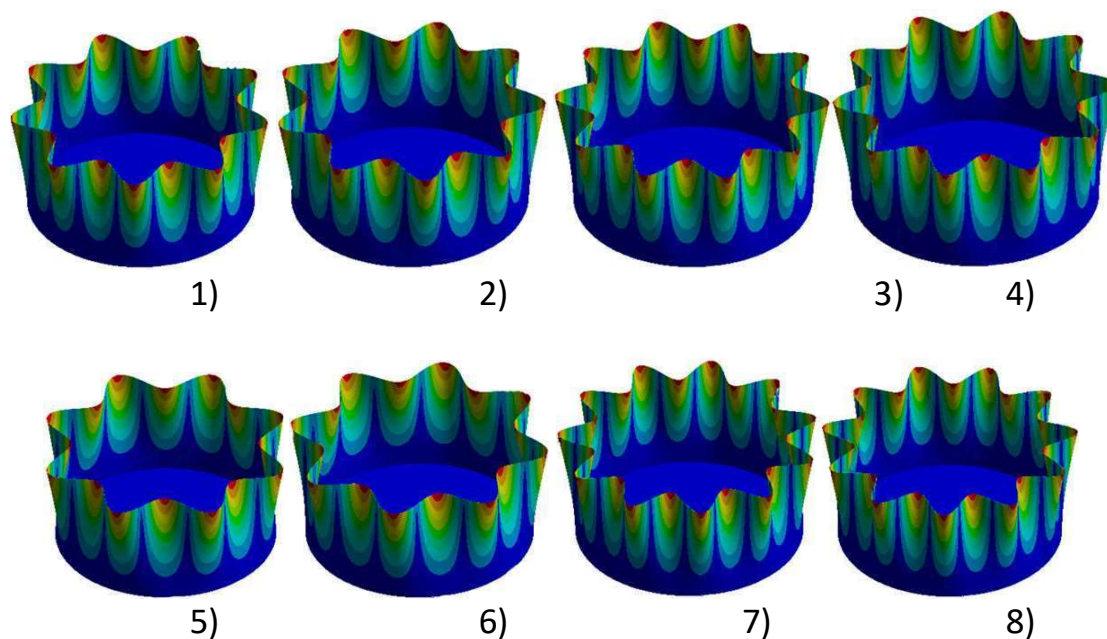


Рисунок 4.9 – Форми коливань пружної незаповненої оболонки з повністю закріпленим днищем

Частоти плескань і в цьому випадку мають такі ж значення, що наведені в таблиці 2.

Далі розглянуто випадок, коли обрана тонкостінна оболонка з товщиною 0.0015 закріплена по контуру днища. Частоти коливань незаповненої оболонки наведено в таблиці 4.9.

Таблиця 4.9

Частоти коливань заповненої оболонки з закріпленням за контуром днища

N форми	1	2	3	4	5	6	7	8
Частота коливань, Гц	3.7417	7.7857	7.7880	12.776	12.781	14.567	18.687	18.689

На рисунку 4.10 зображені відповідні форми коливань пружного днища.

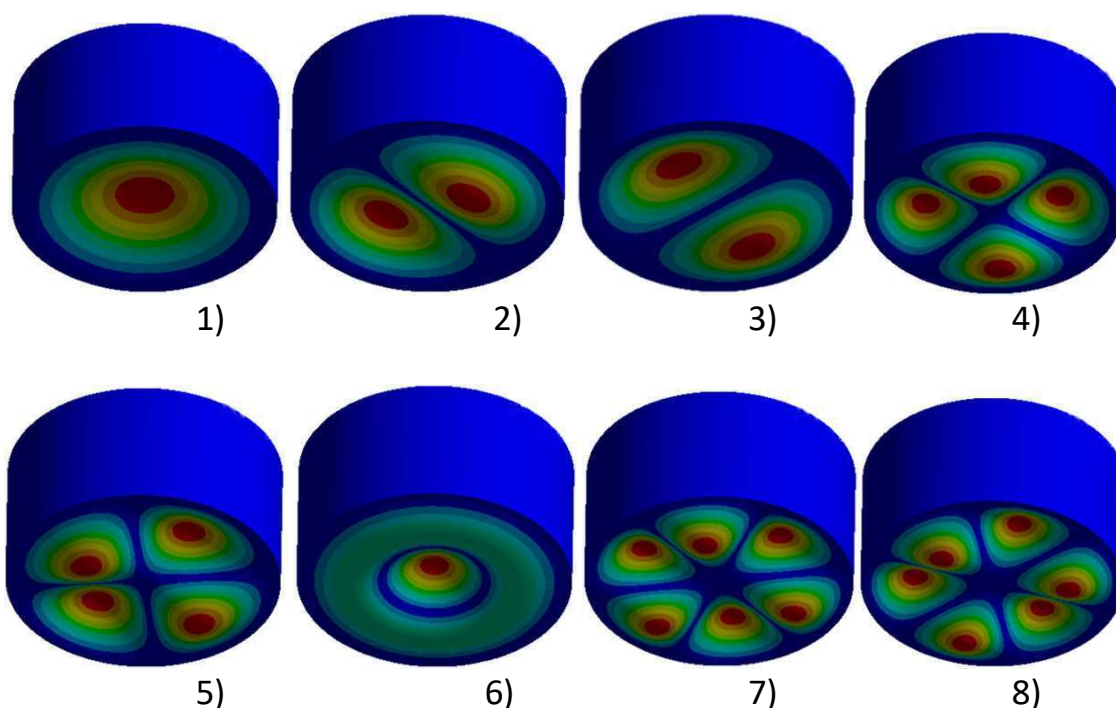


Рисунок 4.10 – Форми коливань пружної незаповненої оболонки закріпленої за контуром днища

Зауважимо, що частоти коливань з врахуванням приєднаних мас рідини сягатимуть значень від 2.422 Гц. Подальше зменшення товщини призведе до того, що спектри частот плескань та коливань пружного днища будуть перемежатись, що призведе до втрати стійкості конструкції.

В роботі розроблено методику визначення динамічних характеристик оболонкових конструкцій, що виготовлені із сталі, та частково заповнені рідиною (нафтопродуктами). Здійснено числовий аналіз динамічних характеристик для моделі резервуарів для збереження рідких вуглеводнів. Визначено оптимальні параметри оболонкових конструкцій для зменшення їх деформацій під час коливання рідини (на прикладі рідких вуглеводнів). Доведено, що врахування пружності стінок баків приводить до істотного зниження частот коливань в порівнянні з частотами незаповнених оболонок, при цьому найменші частоти заповнених і незаповнених оболонкових конструкцій можуть відповідати різним хвильовим числам.

Для всіх розглянутих оболонок частоти плескань є найнижчими. Найнижчим власним частотам оболонки відповідають власні форми гармонік вищих порядків, причому вирішальним фактором є товщина оболонки. Наявність рідини веде до суттєвого зменшення частот коливань пружних стінок. Частоти коливань оболонки з повністю закріпленим днищем суттєво вище за відповідні частоти коливань оболонки з днищем, закріпленим за контуром тому при проектуванні конструкцій варто уникати такого виду закріплення. Тож резервуари з повністю закріпленим днищем представляють більшу екологічну загрозу для довкілля в разі раптових сейсмічних навантажень ніж оболонки з днищем, закріпленим за контуром. Отримані дані дають змогу провести відстроювання від небажаних резонансних частот.

Подовження строку експлуатації резервуарів, збереження їх герметичності і стійкості при різних впливах природного і техногенного походження, попередження витоків, розливів та пожежної небезпеки є необхідним для підвищення рівня екологічної безпеки прилеглих територій.

4.4. Забезпечення демпфування коливань рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях

В роботі розглядається встановлення плаваючих мембран в резервуарах, а також вертикальних і горизонтальних перегородок для демпфування плескань.

4.4.1. Встановлення плаваючої мембрани в резервуарах

Як приклад, пружна циліндрична оболонка з радіусом $R = 1$ м і рівень наповнення $H = 1$ м під дією сейсмічного навантаження з різними параметрами. Передбачається, що товщина оболонки $h = 0.01$ м, Модуль Юнга $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, Коефіцієнт Пуассона $\nu = 0.3$, щільність матеріалу оболонки $\rho = 7800$ кг/м³, щільність рідини $\rho_0 = 1000$ кг/м³. Вважається, що оболонка жорстко закріплена на контурі, тобто граничні умови такі: $u_r = u_z = u_\theta = 0$ at $z=0$ та $r=R$, як на рисунку 4.11.

На першому етапі застосована лінійна постановка. Як було показано в наведених у посиланні роботах¹⁹⁸, найбільший вплив на

¹⁹⁸ Липовий В. О., Удянський М. М. Техногенні ризики забруднення довкілля під час експлуатування та ремонтних робіт резервуарів з нафтопродуктами. Харків : НУГЗУ. 2017. 107 с. [150]; Medvedovskaya T., Strelnikova E., Medvedyeva K. Free hydroelastic vibrations of hydroturbine head covers. *Int. J. Eng. and Advanced Research Technology*. 2015. Vol. 1. № 1. P. 45–50 [151]; Серікова О. М., Стрельнікова О. О., Крютченко Д. В. Оцінка сили сейсмічних навантажень на резервуари для збереження отруйних та легкозаймистих рідин. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*. 2021. Вип. 51. С. 70–80. URL: <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2021-51-08> [152]; Gnitko V., Degtyariov K., Karaiev A., Strelnikova E., Multi-domain boundary element method for axisymmetric problems in potential theory and linear isotropic elasticity, *WIT Transactions on Engineering Sciences*. WIT Press. 2019. P. 13–25. URL: <https://doi.org/10.2495/BE410021> [153]; Strelnikova E., Kriutchenko D., Gnitko V., Degtyarev K. Boundary element method in nonlinear sloshing analysis for shells of revolution under longitudinal excitations. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2020. Vol. 111. P. 78–87. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2019.10.008> [154]; Degtyariov K., Gnitko V., Kononenko Y., Kriutchenko D., Sierikova O., Strelnikova E. Fuzzy Methods for Modelling Earthquake Induced Sloshing in Rigid Reservoirs. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2022. P. 297–302. URL: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916466> [155]; Gnitko V., Degtyariov K., Naumenko V., Strelnikova E. BEM and FEM analysis of the fluidstructure interaction in tanks with baffles, *Int. Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. 2017. Vol. 5 (3). P. 317–328. URL: <https://doi.org/10.2495/CMEM-V5-N3-317-328> [156]; Zheng Jh., Xue M. A., Dou P., et al. A review on liquid sloshing hydrodynamics. *J Hydrodyn*. 2021. Vol. 33. P. 1089–1104. URL: <https://doi.org/10.1007/s42241-022-01111-7> [157]; Raynovskyy I. A., Timokha A. N. Sloshing in Upright Circular Containers: Theory, Analytical Solutions,

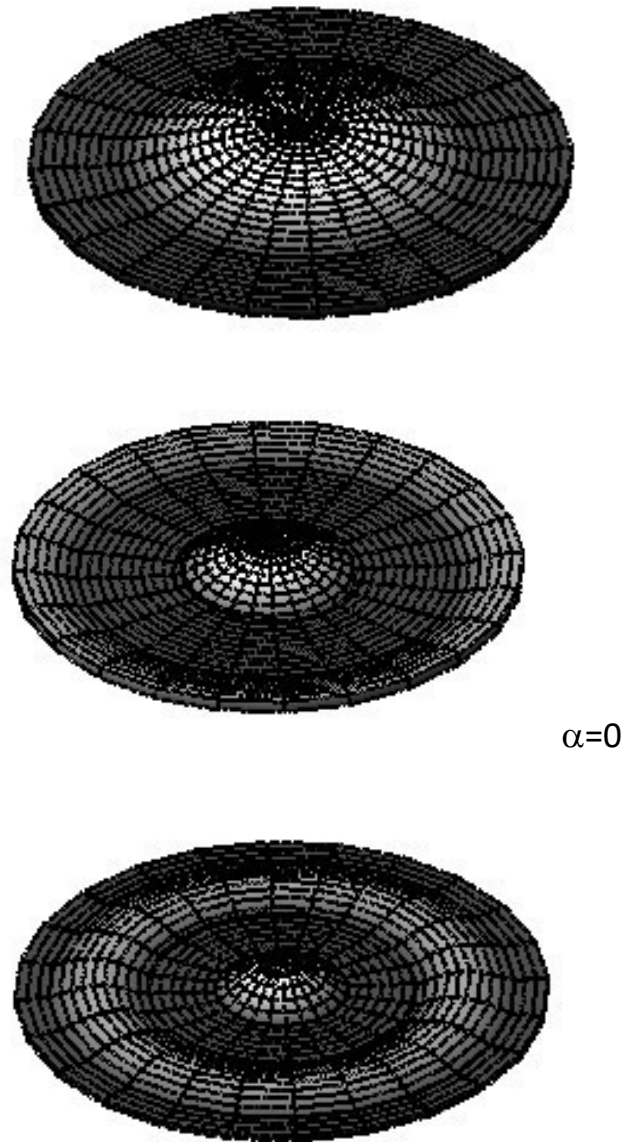
демпфування коливань мають нелінійні ефекти, пов'язані з плесканням наповнювача. Але щоб проаналізувати максимальний рівень підйому рідини, можна обмежитися лінійним формулюванням.

Перш за все, необхідно отримати власні режими коливань рідини, тобто отримати систему основних функцій. Це було зроблено за методиками, описаними в роботах¹⁹⁹. Як було сказано раніше, перша

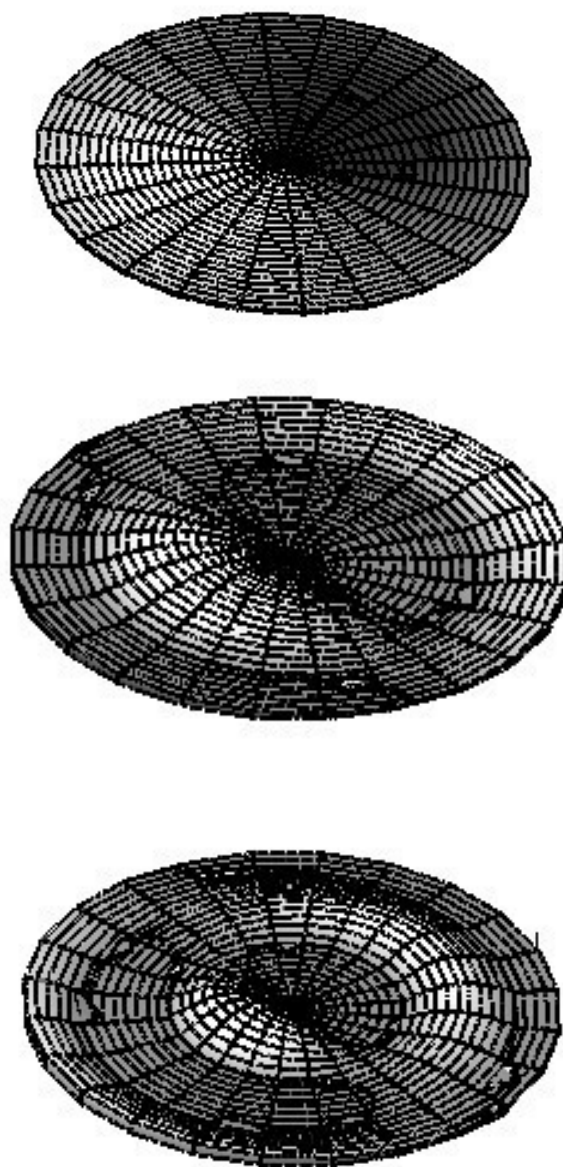
and Applications. CRC Press/Taylor & Francis Group. 2020. 170 p. [158]; Nahornyi V. V., Shevchenko A. V., Lyashchuk V. I., et al. Hydrogeodeformation monitoring as a tool for earthquake prediction in the Dnieper-Krivoy Rog aulacogen. *Journal of Geodynamics*. 2020. Vol. 136. P. 101718 [159]; Венгерський П. С. Чисельне моделювання руху поверхневих і ґрунтових потоків та їх взаємодія на території водозбору : автореф. дис. ... д-ра фіз.-мат. наук : 01.05.02. Львів, 2017 [160]; Li Y., Zhang G., Wang H., et al. Monitoring of groundwater level changes and its relationship with tectonic activities in the North China Plain. *Engineering Geology*. 2023. Vol. 282. P. 106135 [161]; Jing H., Chen H., Yang J., Li P. Shaking table tests on a small-scale steel cylindrical silo model in different filling conditions. *Structures*. 2022. Vol. 37. P. 698–708 [162]; Mansour S., Pieraccini L., Palermo M., Foti D., Gasparini G., Trombetti T., Silvestri S. Comprehensive Review on the Dynamic and Seismic Behavior of Flat-Bottom Cylindrical Silos Filled with Granular Material. *Front. Built Environ*. 2022. 7. 805014 [163]; Про затвердження Правил пожежної безпеки в Україні НАКАЗ МВС України № 1417 від 30.12.2014 (редакція від 03.10.2017 р.) URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15/paran19> [164]; ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги», затверджений наказом Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 04.11.2016 № 297 [165]; ВБН В.2.2-58.1-94 Проектування складів нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа. Зі Зміною № 1 (затвердженою наказом Держнафтогазпрому України від 24.12.1999 № 136а) [166]; Soriano C., Tarazona S. F., Almeida M.C.F., Almeida M.S.S., Borges R. G. Selection of earthquake ground motion accelerograms for the continental margin of Southeastern Brazil. *DYNA*. 2021. Vol. 88 (217). P. 228-236 [167]; Ravnik J., Strelnikova E., Gnitko V., Degtyarev K., Ogorodnyk U. BEM and FEM analysis of fluid–structure interaction in a double tank. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2016. Vol. 67. P. 13-25. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2016.02.006> [168]; Sivanandam S. N., Sumathi S., Deepa S. N. Introduction to Fuzzy Logic Using MATLAB, Springer, Berlin Heidelberg. 2007 [169]; Avramov K.V. Nonlinear modes of parametric vibrations and their applications to beams dynamics, *Journal of Sound and Vibration*. 2009. Vol. 322. P. 476–489. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.07.013> [170].

¹⁹⁹ Khalmuradov B. D., Harbuz S. V., Ablieieva I. Y. Analysis of the technogenic load on the environment during forced ventilation of tanks. *Technology audit and production reserves*. 2018. № 1/3 (39). P. 45–52 [99]; Гарбуз С. В. Системний підхід

гармоніка ($\alpha=1$) є предметом інтересу. Слід зазначити, що осесиметричні гармонічні ($\alpha=0$) також буде взято до уваги, якщо спостерігалася навіть дуже мала вертикальна складова сейсмічного навантаження. На рисунку 4.11 показані перші три моди коливань, що відповідають цим гармонікам.



до зниження екологічної небезпеки вентиляції резервуарів з нафтопродуктами. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Сер.: Механіко-технологічні системи та комплекси*. Харків: НТУ «ХПІ», 2016. № 7 (1179). С. 106–118 [100]; Khalmuradov B., Harbuz S., Ablicieva I. Analysis of the technogenic load on the environment during Forced ventilation of tanks. *Technology audit and production reserves*. 2018. Vol. 1/3 (39). P. 45–52. URL: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.124341> [101].



$$\alpha=1$$

Рисунок 4.11 – Перші моди осесиметричних і неосесиметричних коливань вільної поверхні

У таблиці 4.10 наведені найнижчі частоти коливань вільної поверхні рідини та стінок ємності.

Таблиця 4.10

Найнижчі частоти коливань циліндричної оболонки

Частота, Гц Запропонована МГЕ	Частота, Аналітичні значення (13)	Гармоніки, частотне число	Тип вібрації
0.6418	0.6418	1, 1	плескання
0.9739	0.9739	0, 1	плескання

1.1509	1.1510	1, 2	плескання
1.3208	1.3209	0, 2	плескання
1.4564	1.4566	1, 3	плескання
1.7054	1.7058	1, 4	плескання
1.7096	-	0, 1	нижня вібрація
1.9212	1.9215	1, 5	плескання

Встановлено, що нижні частоти коливань резервуару з рідиною із заданими механічними та геометричними характеристиками є частотами хлюпоту. Розділені частотні спектри коливань вільної поверхні та пружних стінок. Однак, якщо припустити, що дно оболонки пружне, можна виявити, що для досить тонких оболонок частота коливань дна порівнянна (і навіть дуже близька) до однієї з основних частот. Про це свідчать результати таблиці 4.10, а саме видно цю частоту плескання $\omega_{14} = 1.7054$ Гц дуже близька до частоти аксіально-симетричного коливання дна $\omega_{01} = 1.7096$ Гц. Отже, ці результати свідчать про необхідність врахування першої та нульової гармонік при аналізі коливань з урахуванням пружності стінок резервуару.²⁰⁰ Це призводить до наступного представлення невідомих як в роботі ²⁰¹

²⁰⁰ Akkar S., Moghimi S., Arici Y. A study on major seismological and fault-site parameters affecting near-fault directivity ground-motion demands for strike-slip faulting for their possible inclusion in seismic design codes. *Soil Dyn Earthq Eng.* 2018. Vol. 104. P. 88–105 [31]; Kramer S. L. Geotechnical Earthquake Engineering. New Jersey: Prentice Hall, Upper Saddle River. 1996. 672 p. [32]; Shugaylo O., Bilyk S. The Specifics of the Compilation of the Calculated Load Combinations in the Assessment of Seismic Resistance of Steel Supporting Structures of Nuclear Power Plant Equipment and Piping *J. of Mech. Eng.* 2022. Vol. 25 (3). P. 6-15. URL: <https://doi.org/10.15407/pmach2022.03.006> [205]; Серікова О. М., Стрельнікова О. О., Пісня Л. А., Крютченко Д. В. Дослідження впливу пікових амплітуд сейсмічного прискорення при землетрусі на техногенні об'єкти. Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: зб. наук. статей XVI Міжнародної науково-практичної конференції УКРНДІЕП (м. Харків, 14–18 вер. 2020 р.). 2020. С. 221–223 [206].

²⁰¹ Degtyariov K., Gnitko V., Kononenko Y., Kriutchenko D., Sierikova O., Strelnikova E. Fuzzy Methods for Modelling Earthquake Induced Sloshing in Rigid Reservoirs. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2022. P. 297-302. URL: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916466> [54].

$$\mathbf{U} = \sum_{k=1}^N c_k \mathbf{u}_k, \quad \Phi = \sum_{k=1}^N \dot{c}_k \varphi_{1k} + \sum_{k=1}^N \dot{d}_k \varphi_{2k}, \quad \zeta = \sum_{k=1}^N c_k \frac{\partial \varphi_{1k}}{\partial \mathbf{n}} + \sum_{k=1}^N d_k \frac{\partial \varphi_{2k}}{\partial \mathbf{n}} \quad (4.1)$$

Подання (17) призводить до того, що отримано наступну систему звичайних диференціальних рівнянь другого порядку

$$\begin{aligned} \ddot{c}_l(t) + \Omega_l^2 c_l(t) &= + \sum_{k=1}^M \ddot{d}_k(t) (\varphi_{2k}, u_l) + a_x(t)(x, u_l) + \\ &+ a_z(t)(z, u_l) = 0, \\ \ddot{d}(\varphi_{2l}, \varphi_{(2l)}) + (1 + a_z(t)/g) \chi_k^2(\varphi_{2l}, \varphi_{2l}) &+ \sum_{k=1}^N c_k \left(\frac{\partial \varphi_{1k}}{\partial \mathbf{n}}, \varphi_{2l} \right) + \\ &+ a_x(t)(x, \varphi_{2l}) = 0. \end{aligned} \quad (4.2)$$

З рівнянь (18) невідомі функції, що залежать від часу $c_k(t)$ та $d_k(t)$ буде отримано. Для їх однозначного визначення у формі використано початкові умови

$$c_k(0) = c_k, \quad \dot{c}_k(0) = c_{k1}, \quad d_k(0) = d_k, \quad \dot{d}_k(0) = d_{k1} \quad (4.3)$$

Досліджено вимушені коливання пласта при заданому сейсмічному навантаженні.

Таблиця 4.11 надає прискорення для даної сили землетрусу.

Таблиця 4.11

Рівень прискорення через сейсмічність

Магнітуда	5	6	7	8	9	10
Максимальний рівень прискорення (у частках g)	0.025	0.050	0.100	0.200	0.400	0.800

Характерна частота сейсмічного навантаження в 6 точках дорівнює 2 Гц.

Систему диференціальних рівнянь та вихідні дані отримано з урахуванням усього частотного спектру, наведеного в табл. 4.11. Початкові умови наступні:

$$c_k(0) = 0, \quad \dot{c}_k(0) = 0, \quad d_k(0) = 0, \quad \dot{d}_k(0) = 0.$$

Крім того, було припущено, що перед землетрусом заповнений рідиною резервуар перебував у стані спокою.

Далі розглянуто сполучену задачу про коливання рідини в жорсткій циліндричній оболонці з покриттям вільної поверхні тонкою пружною мембраною. Якщо припустити, що між рідиною та пружною оболонкою немає зазору, динамічну граничну умову на межі розділу рідкої області та пружної мембрани можна надати наступним чином

$$\rho_m h_m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + T \Delta^2 w = -\rho_l \frac{\partial \Phi}{\partial t} - (g + a_z(t))w - a_x(t)x, \quad (4.4)$$

де w є прогин пружної пластини, t це час, і T є напругою, і ρ_m, h_m є, відповідно, щільністю та товщиною мембрани. Права частина (4.2) – це тиск рідини, що діє на пружну оболонку, отримане з лінеаризованого рівняння Бернуллі.

Лінеаризований кінематичний стан на поверхні розділу можна записати як

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial n} \right|_{S_0} = \frac{\partial w}{\partial t} \quad (4.5)$$

На жорсткі бічні стінки та дно резервуара застосовано непроникну граничну умову

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial n} \right|_{S_1} = 0 \quad (4.6)$$

Потенціал Φ був задоволений рівнянням Лапласа

$$\nabla^2 \Phi = 0. \quad (4.7)$$

Крім того, накладені граничні умови для контуру мембрани. Найбільш часто використовуваними типами є затиснуті, вільні та просто підтримувані умови. Для затиснутого контуру використовується умова Діріхле, а саме $w(R) = 0$, а для вільного контуру була задіяна умова Ньюмена

$$\left. \frac{\partial w}{\partial r} \right|_{r=R} = 0. \quad (4.8)$$

Саме умову (4.8) слід вибрати для адекватного опису плаваючої кришки.

Крім того, отримано наступну крайову задачу, яка описується рівняннями (4.4), (4.7) з граничними умовами (4.5), (4.6), (4.8).

Для її чисельного розв'язання використано метод суперпозиції мод, як у (4.11). По-перше, з рівняння були отримані частоти і моди мембрани без взаємодії з рідиною

$$\rho_m h_m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + T \Delta^2 w = 0 \quad (4.9)$$

Потім представлення для w було застосовано як

$$w = \sum_{k=1}^M c_k w_k, \quad (4.10)$$

де w_k є власними мембранними режимами. Для функції Φ було використано в наступному вигляді:

$$\Phi = \sum_{k=1}^M \dot{c}_k \phi_k, \quad (4.11)$$

де функції ϕ_k є рішеннями наступних крайових задач:

$$\nabla^2 \phi_k = 0, \quad \left. \frac{\partial \phi_k}{\partial n} \right|_{S_0} = \frac{\partial w_k}{\partial t}, \quad \left. \frac{\partial \phi_k}{\partial n} \right|_{S_1} = 0. \quad (4.12)$$

Підставляючи ряди (4.10), (4.11) у (4.4), приходимо до системи диференціальних рівнянь другого порядку відносно залежних від часу невідомих $[c_1, c_2, \dots, c_M]$.

Відповідно до роботи (33,34) була побудована штучна акселерограма $a_x(t)$. Рисунок 2а) демонструє $a_x(t)$ для землетрусу з магнітудою 6 балів і характерною частотою, що дорівнює 2 Гц, а рисунок 2б) показує рівень вільної поверхні в часі. Тут ми розглядаємо резервуар без покриття мембраною.

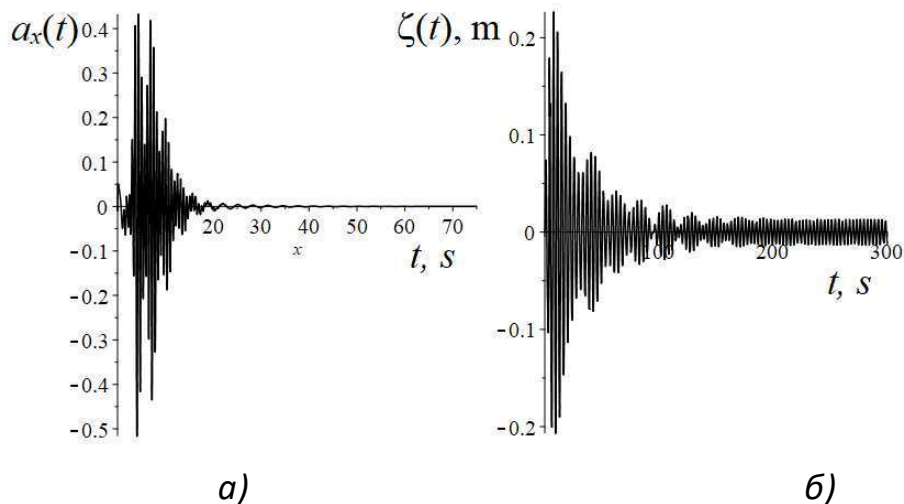


Рисунок 4.12. Акселерограма та рівень вільної поверхні в часі.

Вертикальним прискоренням вважаємо $a_z(t) = 0.005 \text{ м/с}^2$. На малюнку 2б) показана залежність від часу ζ в точці з координатами $r=R, z=H, \theta=0$.

З чисельних результатів зроблено висновок, що зміна рівня рідини становить близько 0,4 м. Така зміна може призвести до великого тиску на стінки бака. Нормований тиск p_n було розраховано за допомогою рівняння (15). Тут $p_n = (p - p_0) / \rho_l$. Залежність p_n від часу зображено на рисунку 4.12.а). Для порівняння на рисунку 4.12.б) можна побачити залежність p_n від часу, нехтуючи наслідками плескання. Та сама точка з координатами $r=R, z=H, \theta=0$ було обрано для чисельного моделювання.

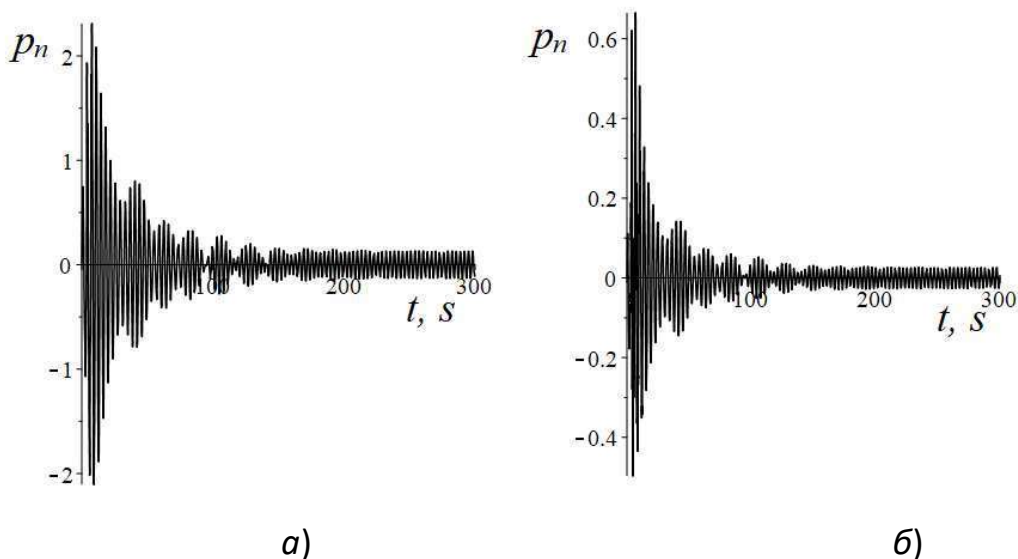


Рисунок 4.13. Часові історії p_n

Отримані результати свідчать про необхідність зниження рівня плескання. Для цього використовуються різні демпферні пристрої. Серед них є горизонтальні та вертикальні перегородки, запропоновані в роботі Gnitko V., Degtyariov K., Naumenko V., Strelnikova E.²⁰². Установка перегородок призводить до зміщення частотного спектру. Але частоти сил збудження в результаті штучних землетрусів, терактів можуть мати широкий спектр.

Робота Degtyariov K., Gnitko V., Kononenko Y., та ін.²⁰³ показує, що установка плаваючої кришки призводить до значної зміни частот.

Як в роботах, що наведені у посиланні нижче,²⁰⁴ еластична мембрана була використана для зменшення плескання. Але тут

²⁰² Gnitko V., Degtyariov K., Naumenko V., Strelnikova E. BEM and FEM analysis of the fluidstructure interaction in tanks with baffles, *Int. Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. 2017. Vol. 5 (3). P. 317–328. URL: <https://doi.org/10.2495/CMEM-V5-N3-317-328> [204].

²⁰³ Degtyariov K., Gnitko V., Kononenko Y., Kriutchenko D., Sierikova O., Strelnikova E. Fuzzy Methods for Modelling Earthquake Induced Sloshing in Rigid Reservoirs. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2022. P. 297-302. URL: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916466> [54].

²⁰⁴ Липовий В. О., Удяньський М. М. Техногенні ризики забруднення довкілля під час експлуатування та ремонтних робіт резервуарів з нафтопродуктами. Харків : НУГЗУ. 2017. 107 с. [150];

Medvedovskaya T., Strelnikova E., Medvedyeva K. Free hydroelastic vibrations of hydroturbine head covers. *Int. J. Eng. and Advanced Research*

Technology. 2015. Vol. 1. № 1. P. 45–50 [151]; Серікова О. М., Стрельнікова О. О., Крютченко Д. В. Оцінка сили сейсмічних навантажень на резервуари для збереження отруйних та легкозаймистих рідин. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*. 2021. Вип. 51. С. 70-80. URL: <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2021-51-08> [152]; Gnitko V., Degtyariov K., Karaiev A., Strelnikova E., Multi-domain boundary element method for axisymmetric problems in potential theory and linear isotropic elasticity, *WIT Transactions on Engineering Sciences*. WIT Press. 2019. P. 13–25. URL: <https://doi.org/10.2495/BE410021> [153]; Strelnikova E., Kriutchenko D., Gnitko V., Degtyarev K. Boundary element method in nonlinear sloshing analysis for shells of revolution under longitudinal excitations. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2020. Vol. 111. P. 78-87. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2019.10.008> [154]; Degtyariov K., Gnitko V., Kononenko Y., Kriutchenko D., Sierikova O., Strelnikova E. Fuzzy Methods for Modelling Earthquake Induced Sloshing in Rigid Reservoirs. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2022. P. 297-302. URL: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916466> [155]; Gnitko V., Degtyariov K., Naumenko V., Strelnikova E. BEM and FEM analysis of the fluidstructure interaction in tanks with baffles, *Int. Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. 2017. Vol. 5 (3). P. 317–328. URL: <https://doi.org/10.2495/CMEM-V5-N3-317-328> [156]; Zheng Jh., Xue M. A., Dou P., et al. A review on liquid sloshing hydrodynamics. *J Hydrodyn*. 2021. Vol. 33. P. 1089–1104. URL: <https://doi.org/10.1007/s42241-022-01111-7> [157]; Raynovskyy I. A., Timokha A. N. Sloshing in Upright Circular Containers: Theory, Analytical Solutions, and Applications. CRC Press/Taylor & Francis Group. 2020. 170 p. [158]; Nahornyi V. V., Shevchenko A. V., Lyashchuk V. I., et al. Hydrogeodeformation monitoring as a tool for earthquake prediction in the Dnieper-Krivoy Rog aulacogen. *Journal of Geodynamics*. 2020. Vol. 136. P. 101718 [159]; Венгерський П. С. Чисельне моделювання руху поверхневих і ґрунтових потоків та їх взаємодія на території водозбору : автореф. дис. ... д-ра фіз.-мат. наук : 01.05.02. Львів, 2017 [160]; Li Y., Zhang G., Wang H., et al. Monitoring of groundwater level changes and its relationship with tectonic activities in the North China Plain. *Engineering Geology*. 2023. Vol. 282. P. 106135 [161]; Jing H., Chen H., Yang J., Li P. Shaking table tests on a small-scale steel cylindrical silo model in different filling conditions. *Structures*. 2022. Vol. 37. P. 698–708 [162]; Mansour S., Pieraccini L., Palermo M., Foti D., Gasparini G., Trombetti T., Silvestri S. Comprehensive Review on the Dynamic and Seismic Behavior of Flat-Bottom Cylindrical Silos Filled with Granular Material. *Front. Built Environ*. 2022. 7. 805014 [163]; Про затвердження Правил пожежної безпеки в Україні НАКАЗ МВС України № 1417 від 30.12.2014 (редакція від 03.10.2017 р.) URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15/paran19> [164]; ДБН

отримано залежні від часу рішення. Затискна силіконова мембрана з радіусом $R = 1$ м, товщина $h_m = 0.001$ м, щільність матеріалу $\rho_m = 2800$ кг/м³, модуль Юнга $E = 50$ МПа, Коефіцієнт Пуассона $\nu = 0.49$ мав бути застосований.

Рисунок 4.14 а) демонструє порівняння зміни рівня вільної поверхні з мембраною як покриття та без неї, а рисунок 4.14 б) показує залежність p_n від часу. Чорні лінії відповідають коливанням без покриття, а синіми лініями позначено криві, отримані при припущенні наявності еластичної мембрани, встановленої на рівні вільної поверхні.

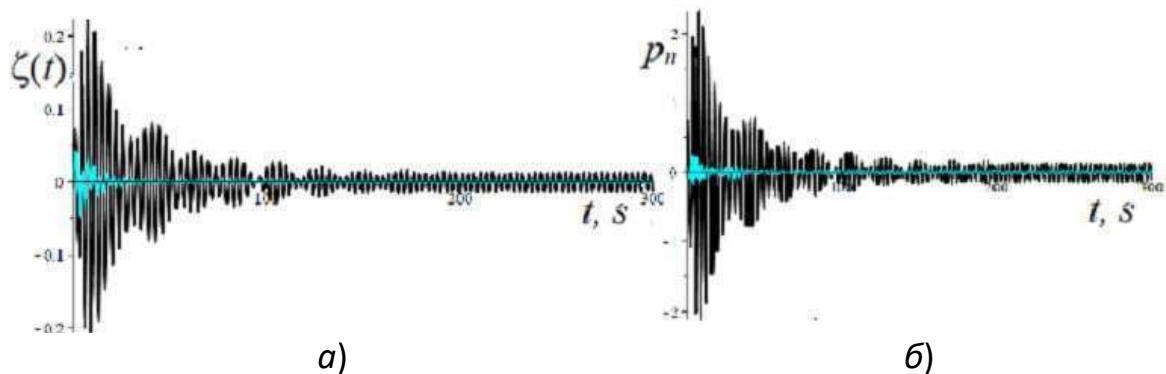


Рисунок 4.14 Часові історії ζ та p_n

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що встановлення мембрани призводить до значного зниження як рівня підйому вільної поверхні, так і тиску на стінки бака.

В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги», затверджений наказом Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 04.11.2016 № 297 [165]; ВБН В.2.2-58.1-94 Проектування складів нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа. Зі Зміною № 1 (затвердженою наказом Держнафтогазпрому України від 24.12.1999 № 136а) [166]; Soriano C., Tarazona S. F., Almeida M.C.F., Almeida M.S.S., Borges R. G. Selection of earthquake ground motion accelerograms for the continental margin of Southeastern Brazil. *DYNA*. 2021. Vol. 88 (217). P. 228-236 [167]; Ravnik J., Strelnikova E., Gnitko V., Degtyarev K., Ogorodnyk U. BEM and FEM analysis of fluid–structure interaction in a double tank. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2016. Vol. 67. P. 13-25. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2016.02.006> [168]; Sivanandam S. N., Sumathi S., Deepa S. N. Introduction to Fuzzy Logic Using MATLAB, Springer, Berlin Heidelberg. 2007 [169]; Avramov K.V. Nonlinear modes of parametric vibrations and their applications to beams dynamics, *Journal of Sound and Vibration*. 2009. Vol. 322. P. 476–489. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.07.013> [170].

Ці дані можуть бути корисними для оцінки експлуатаційної надійності резервуарів при сейсмічних навантаженнях.

Розглянуто коливання рідини в твердих і пружних резервуарах. Встановлено, що зміна рівня в часі для резервуарів без покривної мембрани може бути дуже великою і призводити до виникнення надлишкового тиску на стінку резервуара. Установка плаваючої мембрани призводить до зниження як рівня вільної поверхні, так і тиску на стінки бака.

Ці результати дозволяють запобігти руйнуванню резервуарів і продовжити термін їх служби за допомогою кришки плаваючої мембрани. Це дозволить підвищити рівень екологічної безпеки прилеглих до резервуарів територій та запобігти виникненню надзвичайних ситуацій.

4.4.2 Розробка корисної моделі вертикального циліндричного резервуара для зберігання небезпечних рідин

Корисна модель відноситься до галузі техногенно-екологічної безпеки, зокрема до засобів зберігання небезпечних рідин.

Найближчим аналогом та обраний нами прототипом є вертикальний циліндричний резервуар²⁰⁵, виконаний у вигляді порожнистого прямого кругового циліндра, а його дах виконаний конічним і закріплений із цим циліндром.

Недоліком відомого аналога є те, що при сейсмічному навантаженні внаслідок землетрусу, близького вибуху або іншої події при частковому заповненні резервуара рідиною виникає явище плескання. При цьому рух рідини створює підвищений локалізований тиск рідини на стінки резервуара, що в свою чергу призводить до руйнування конструкції резервуара або до втрати його стійкості. Внаслідок цього виникає ризик потрапляння небезпечної рідини у навколишнє середовище та створюється можливість для виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру – пожеж, вибухів, забруднення елементів довкілля, тощо.

²⁰⁵ Абрамов Ю. О., Басманов О. Є., Олійник В. В. Пат. UA 152609 U, Україна, МПК B65D 88/34 (2006.01). Резервуар для нафтопродуктів/патентовласник: Національний університет цивільного захисту України. № u202202966; заяв. 16.08.2022; опубл. 23.03.2023, бюл. № 12 [147].

В основу корисної моделі покладено завдання вдосконалення вертикального циліндричного резервуара для безпечного зберігання рідини шляхом зменшення тиску рідини на стінки резервуара внаслідок явища плескання.

Поставлене завдання вирішується завдяки використанню в конструкції резервуара гнучкої кришки-мембрани з композиційного матеріалу, що плаває на поверхні рідини.

Це дає змогу зменшити амплітуду коливань поверхні рідини завдяки гасінню коливань гнучкою кришкою, знизивши величину локалізованого тиску рідини на стінки резервуара. При цьому використання для виготовлення кришки композиційного матеріалу дозволяє забезпечити необхідну міцність, корозійну стійкість та зменшити вагу кришки та резервуара в цілому, а також забезпечити захист від потрапляння в небезпечну рідину сторонніх предметів та речовин (рисунок 4.14.).

Вертикальний циліндричний резервуар для зберігання небезпечних рідин працює таким чином. При землетрусі, близькому вибуху або іншій події, пов'язаній з сейсмічним навантаженням, небезпечна рідина 3 в резервуарі 1 починає коливатися. Коливання рідини призводять до утворення на її вільній поверхні хвиль та сплесків. Гнучка кришка-мембрана з композиційного матеріалу 4, що плаває на поверхні рідини 3, гасить коливання поверхні та прибирає ефект плескання.

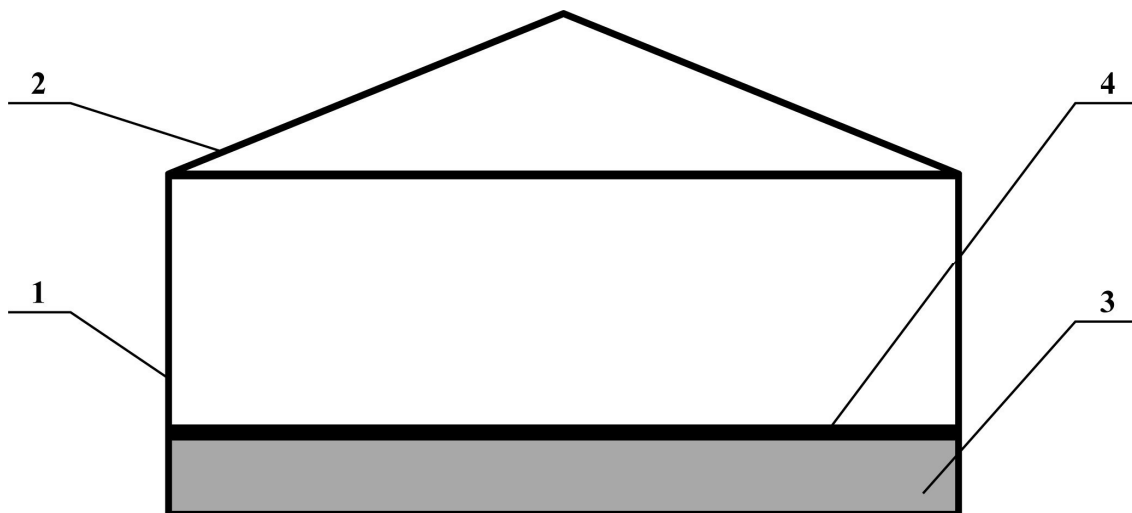


Рисунок 4.14 Схематичне зображення вертикального циліндричного резервуара для зберігання небезпечних рідин, де: 1 –

циліндрична частина резервуара; 2 – дах резервуара; 3 – небезпечна рідина; 4 – гнучка кришка-мембрана з композиційного матеріалу. Дах 2 закріплений на циліндричній частині 1 резервуара, а гнучка кришка-мембрана з композиційного матеріалу плаває на поверхні рідини

Пропонована корисна модель істотно поліпшує умови зберігання небезпечних рідин. Технічне рішення корисної моделі дозволяє зменшити амплітуду коливань поверхні рідини при сейсмічному навантаженні та знизити величину локалізованого тиску рідини на стінки резервуара. При цьому забезпечується захист від потрапляння в небезпечну рідину сторонніх предметів та речовин. Крім того зменшується вага кришки та резервуара в цілому, що поліпшує умови його транспортування, встановлення та експлуатації.

4.4.3. Моделювання впливу внутрішніх перегородок в резервуарах на рівень плескань вільної поверхні рідини при сейсмічних навантаженнях

Оболонки та оболонкові конструкції, що мають відділення, частково заповнені рідиною, широко застосовуються в сучасній техніці. Це паливні баки і контейнери, які застосовуються в різних галузях, таких як енергетичне машинобудування, аерокосмічна, нафтогазова промисловість, і транспорт. Найчастіше такі резервуари працюють при підвищених експлуатаційних навантаженнях та містять агресивні або легкозаймисті заповнювачі. При інтенсивних силових впливах, раптово прикладеному навантаженні в резервуарах, що частково заповнені рідиною, спостерігається явище плескання. Наземні циліндричні цистерни використовуються для зберігання різноманітних рідин - води для пиття та гасіння пожеж, нафти, вина, зрідженого природного газу, тощо. Поломка цистерн після руйнівних землетрусів може призвести до підвищення екологічної небезпеки, втрати цінного вмісту, пожеж. Неадекватно спроектовані цистерни зазнали великої шкоди в минулих землетрусах, що призвело до катастрофічних наслідків. Ґрунтовні огляди досліджень, присвячених проблемам плескань, надані в²⁰⁶.

²⁰⁶ Lukovsky. Numerical simulation of sloshing of a liquid in a moving closed rectangular container. *International Journal of Fluid Mechanics Research*. 1999. Vol. 26 [231]; Kubenko V. D., Koval'chuk P. S. Nonlinear problems of the dynamics of elastic shells partially filled with a liquid. *International Applied Mechanics*. 1999. Vol.

В цій роботі досліджено вплив перегородок на рівень підйому вільної поверхні при раптово прикладеному навантаженні.

Розглянемо жорстку циліндричну оболонку з плоским днищем, частково заповнену рідиною. Параметри резервуара є такими: радіус $R = 1$ м, довжина $L = 2$ м, рівень заповнення $H = 1.0$ м.

Визначимо тиск p на стінки оболонки з лінеаризованого інтегралу Коші-Лагранжа за формулою

$$p = -\rho_l(\Phi'_t + g\zeta) + p_0 + a_s(t)x, \quad (4.13)$$

де $a_s(t)$ – функція, що характеризує зовнішній вплив (горизонтальний сейсм або імпульс).

Вважаємо, що радіальне навантаження раптово прикладається до бічної поверхні резервуара як

$$a_s(t) = Q_0 a(t),$$

де Q_0 – розподілений тиск,

$$a(t) = \begin{cases} 1, & t < T \\ 0, & t \geq T \end{cases}.$$

Вважаємо, що $Q_0 = 10$ МПа, $T = 1.5$ с.

Після підстановки виразів, отриманих в [204,218], у вигляді

$$\Phi = \sum_{k=1}^M \dot{d}_k \varphi_{2k}, \quad \zeta = \sum_{k=1}^M d_k(t) \frac{\partial \varphi_{2k}}{\partial \mathbf{n}} \quad (4.14)$$

в рівняння (1), вважаючи, що $x = r \cos \theta$, приходимо до співвідношення

$$\sum_{k=1}^M \ddot{d}_k \varphi_{2k} + g \sum_{k=1}^M d_k \frac{\partial \varphi_{2k}}{\partial \mathbf{n}} + a_s(t)r = 0 \quad (4.15)$$

Після знаходження скалярного добутку рівняння (3) на ортогональні згідно з [1] функції φ_{2l} ($l = \overline{1, M}$) отримаємо

$$\ddot{d}_k + \chi_k^2 d_k + a_s(t)F_k = 0; \quad F_k = (r, \varphi_{2k}) / (\varphi_{2k}, \varphi_{2k}); \quad k = \overline{1, M} \quad (4.16)$$

Припустимо, що до подання горизонтального імпульсу бак знаходився у стані спокою. Тоді маємо розв'язати (4) за нульових початкових умов. Застосовано операційний метод для розв'язання системи (4). Отримані такі значення коефіцієнтів:

$$\frac{d_k(t)}{Q_0} = \begin{cases} \frac{1}{\chi_k^2} - \frac{1}{\chi_k^2} \cos(\chi_k t), & 0 \leq t \leq T, \\ \frac{1}{\chi_k^2} - \frac{1}{\chi_k^2} \cos(\chi_k t) - \frac{1}{\chi_k^2} + \frac{1}{\chi_k^2} \cos \chi_k (t - T), & t > T. \end{cases}$$

Підставивши ці коефіцієнти у співвідношення (3), знаходимо залежність рівня вільної поверхні від часу.

Зазначимо, що динаміка резервуарів як з перегородками, так і без них, при імпульсних або сейсмічних навантаженнях моделюється рівняннями (3).

Моделльне сейсмічне навантаження подано формулою

$$a(t) = \begin{cases} 0.02 \sin(\pi t / 5) \cos(2\pi t), & t < T, \\ 0, & t \geq T. \end{cases}$$

далі отримаємо для зображень Лапласа

$$p^2 D_m + \omega_{1m}^2 D_m = -F_1 \left(\frac{12\pi}{5} (p^2 + \left(\frac{12\pi}{5} \right)^2) (1 - e^{-pT}) + F_2 \left(\frac{9\pi}{5} (p^2 + \left(\frac{9\pi}{5} \right)^2) (1 - e^{-pT}) \right)$$

Визначені D_m підставимо в оригінали при $t < T$

$$d_m = -\frac{F_1}{\Omega_1^2 - \omega_{1m}^2} \left[\frac{\Omega_1 \sin(\omega_{1m} t)}{\omega_{1m}} - \sin(\Omega_1 t) \right] + \frac{F_2}{\Omega_2^2 - \omega_{1m}^2} \left[\frac{\Omega_2 \sin(\omega_{1m} t)}{\omega_{1m}} - \sin(\Omega_2 t) \right]$$

і при $t > T$.

$$d_m = -\frac{F_1}{\Omega_1^2 - \omega_{1m}^2} \left[\frac{\Omega_1 \sin(\omega_{1m}(t-T))}{\omega_{1m}} - \sin(\Omega_1(t-T)) \right] + \frac{F_2}{\Omega_2^2 - \omega_{1m}^2} \left[\frac{\Omega_2 \sin(\omega_{1m}(t-T))}{\omega_{1m}} - \sin(\Omega_2(t-T)) \right],$$

На рисунку 4.15. а, б зображено висоту підйому вільної поверхні при $r = 1.0$ м залежно від часу для імпульсного та сейсмічного навантажень

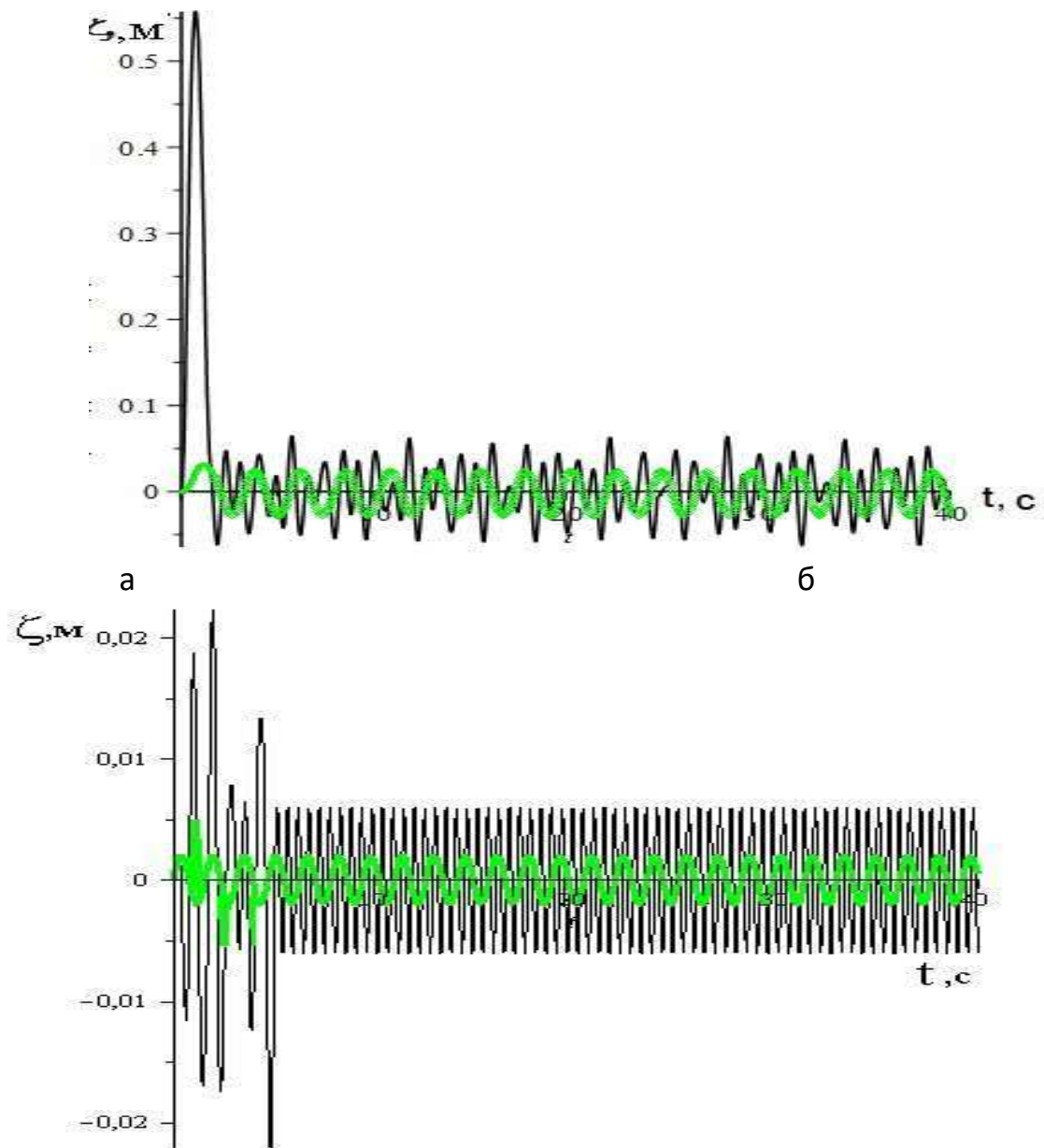


Рисунок 4.15 – Висота підйому вільної поверхні при імпульсному (а) та сейсмічному (б) навантаженні в залежності від часу

На рисунку 4.15 чорні лінії позначають висоту підйому вільної поверхні рідини в баку без перегородки, а зелені лінії – в баку з кільцевою перегородкою, що встановлена на висоті 0.8 м. Слід зазначити, що амплітуда висоти вільної поверхні не зменшується із часом, але має періодичну поведінку. Причина цього явища полягає в обмеженнях запропонованої моделі для аналізу коливань, яка полягає

в класичній динаміці систем без демпфування. Це означає, що всі точки системи здійснюють гармонічні коливання без зменшення амплітуди з часом. Однак отримані результати свідчать про те, що встановлення перегородок приводить до зменшення як частот вібрацій рідини, так і рівня піднесення вільної поверхні.

Надалі, на рисунку 4.16. наведено графіки зміни рівня вільної поверхні з часом за умови дії синтезованого землетрусу²⁰⁷. Крім того, за методикою²⁰⁸ в рівняннях (3) наближено враховано демпфування.

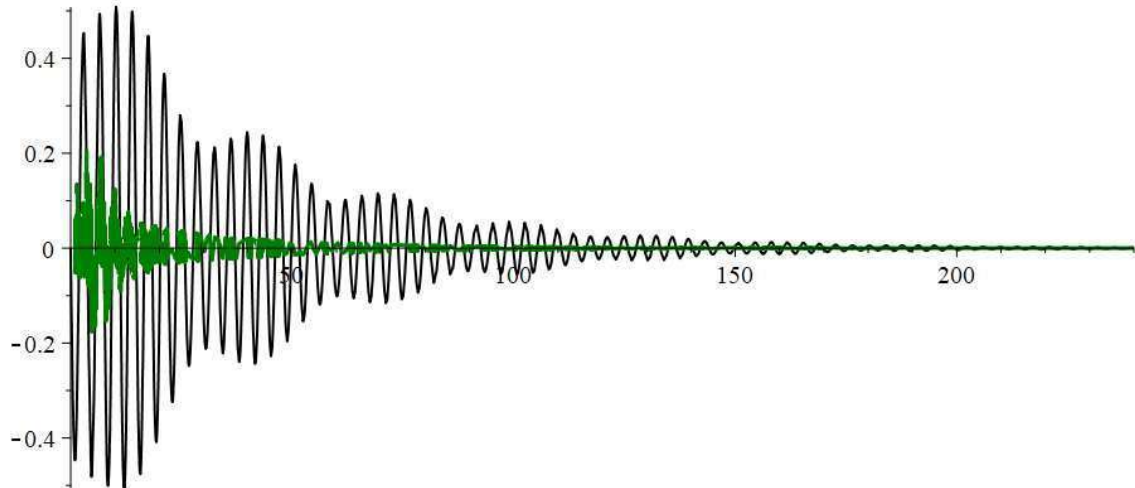


Рисунок 4.16 Висота підйому вільної поверхні рідини в циліндричному резервуарі під дією сейсмічного навантаження

Тут також чорні лінії позначають висоту підйому вільної поверхні рідини в баку без перегородки, а зелені лінії – в баку з кільцевою перегородкою на висоті 0.8 м.

Бачимо, що наявність перегородки веде до суттєвого зменшення амплітуди підйому вільної поверхні, що дає змогу запобігти виплескуванню небезпечного заповнювача та негативного впливу на навколишнє середовище²⁰⁹.

²⁰⁷ Шульженко М. Г., Гонтаровський П. П., Гармаш Н. Г., Глядя А. О., Швецов В. Л., Гришин М. М., Губський О. М. Оцінка реакції потужного турбоагрегату на сейсмічне навантаження. Вібрації в техніці та технологіях. 2016. № 2 (82). С. 85–93 [234].

²⁰⁸ Abramson, H. N., The Dynamic Behaviour of Liquids in Moving Containers. NASA SP- 106, Washington, D.C., 1966, updated by Dodge, F.T., Southwest Research Institute. 2000. P. 23-37 [235].

²⁰⁹ Shimizu N. Advances and Trends in Seismic Design of Cylindrical Liquid Storage Tanks. JSME. 1990. Vol. 33, № 2. P. 111–124 [230]; Lukovsky. Numerical

4.5. Оцінка впливу обводненості ґрунту на стійкість резервуару в умовах сейсмічної активності

Математичні моделі в 2D і 3D формулюванні працюють від будь-якого значення початкового рівня ґрунтових вод.

Першим кроком було визначення необхідної кількості членів у ряді (7) для оцінки невідомих функцій із заданою точністю. Збіжність була встановлена, коли число членів у ряді дорівнювало 4 для обох m

simulation of sloshing of a liquid in a moving closed rectangular container. *International Journal of Fluid Mechanics Research*. 1999. Vol. 26 [231]; Kubenko V. D., Koval'chuk P. S. Nonlinear problems of the dynamics of elastic shells partially filled with a liquid. *International Applied Mechanics*. 1999. Vol. 36. № 4. P. 421–448 [232]; Strelnikova E., Gnitko V., Krutchenko D., Naumenko Y. Free and forced vibrations of liquid storage tanks with baffles. *Journal of Modern Technology & Engineering*. 2018. Vol. 3. № 1. P. 15–52 [233]; Шульженко М. Г., Гонтаровський П. П., Гармаш Н. Г., Глядя А. О., Швецов В. Л., Гришин М. М., Губський О. М. Оцінка реакції потужного турбоагрегату на сейсмічне навантаження. Вібрації в техніці та технологіях. 2016. № 2 (82). С. 85–93 [234]; Abramson, H. N., The Dynamic Behaviour of Liquids in Moving Containers. NASA SP- 106, Washington, D.C., 1966, updated by Dodge, F.T., Southwest Research Institute. 2000. P. 23-37 [235]; Langeveld J. M. The Design of Large Steel Storage Tanks for Crude Oil and Natural Gas. *Proceedings of the Annual Meeting of the International Institute of Welding*. 1974. P. 35–95 [236]; Бредун В. І., Харламова О. В., Шмандій В. М. Механізм формування екологічної небезпеки у регіоні під впливом техногенної сейсмічності. Екологічний інтелект. Зб. наук. праць за матеріалами V Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених. (Дніпро, 08-09 квітня 2010 р.) Дніпропетровськ : Дніпроп. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. С. 27–29 [237]; Шмандій В. М., Бредун В. І. Особливості формування екологічної небезпеки у регіонів під впливом техногенних землетрусів. Збалансований (сталий) розвиток України – пріоритет національної політики: матеріали Всеукраїнської екологічної конф. (Київ, 26 жовтня 2010 р.). Київ : Центр екологічної інформації, 2010. С. 322–326 [238]; Ha J. Gon, Park H. Joon, Lee M. Kyo, Lee H., Kim D.-S., Kwon S., Kim H. Seismic behavior of LNG storage tank considering soil-foundationstructure interaction with different foundation types. *Proc. of the 19th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (COEX, Seoul, Sep. 17 – 22, 2017) ed. by W. Lee, J.-S. Lee, H.-K. Kim, D.-S. Kim. Seoul. 2017. P. 931–934 [239]; Бойченко С. В., Пузік О. Г., Топільницький П. І., Черняк Л. М., Романчук В. В., Бабатунд О., Лейда К. Оцінка екологічного впливу нафтопереробного підприємства на навколишнє середовище. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2016. № 4. С. 109–122 [240].

та n . Така висока збіжність була досягнута завдяки наявності експоненціальних множників у знаменниках, подібних до

$$\pi k \cosh(\pi k l (a + l)), k=1,2,\dots$$

Далі вибрано наступні вихідні дані: $l=500\text{m}$, $a=b=1000\text{m}$, $L=6\text{m}$, f, s, g, d, k є додатковим поповненням підземних вод (прибуткова частина балансу підземних вод); поповнення підземних вод атмосферними водами (прибуткова частина балансу підземних вод); швидкість транспірації (дебет балансу підземних вод); швидкість випаровування (дебет балансу підземних вод); відповідно видобуток підземних вод (видаткова частина балансу підземних вод).

Значення зміни рівня ґрунтових вод при постійній евапотранспірації отримано в 2D та 3D постановках і представлено розрахунками для обмежених територій Харкова на рисунку 4.17, де показано функцію $h_1(x, y)$. У цьому випадку передбачалося, що величина зміни рівня ґрунтових вод була розрахована на $y=3$ і різні значення z .

Цифрою 1 позначено значення, отримані з використанням 2D моделі, цифрами 2, 3, 4 відповідають значення $z = (l + a) \frac{\pi}{4}$,

$$z = (l + a) \frac{\pi}{6} \text{ та } z=0.$$

З цих результатів можна зробити висновок, що значення зміни рівня ґрунтових вод, отримані при 3D моделюванні, менші, ніж отримані в результаті розрахунків, проведених відповідно до двовимірної теорії. Таким чином, дані двовимірного моделювання можна використовувати як верхню межу для оцінки зміни рівня ґрунтових вод. Зміна рівня ґрунтових вод при інших значеннях y продемонструвала подібну поведінку. Ці дані наведені на рисунку 4.17.

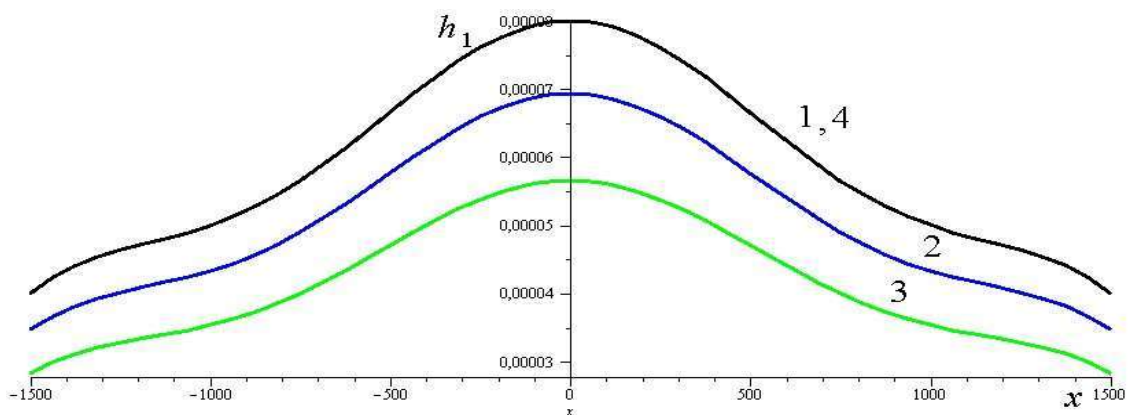


Рисунок 4.17 – Зміна рівня ґрунтових вод при інших значеннях y

Рівень ґрунтових вод змінюється при $y = -2$ і різні значення z представлені на рисунку 4.18.

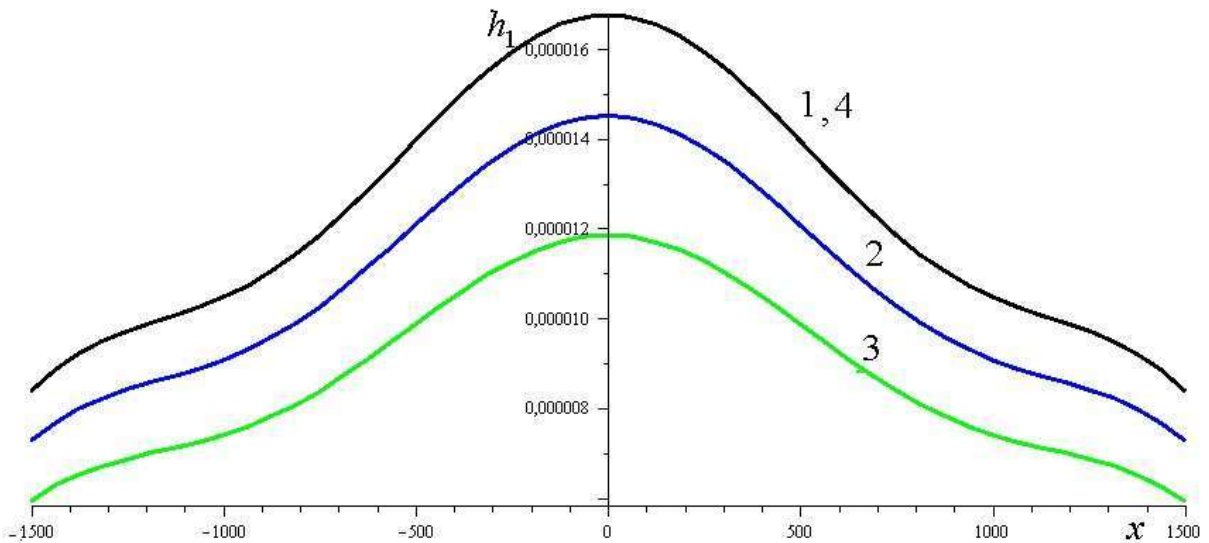


Рисунок 4.18 – Зміна рівня ґрунтових вод при $y = -2$ та різних значеннях z

Також отримано значення зміни рівня ґрунтових вод під час змінної евапотранспірації, які показано на рисунку 4.18 Тут цифри 1, 2, 3 відповідають значенням $z = (l + a) \frac{\pi}{2}$, $z = (l + a) \frac{\pi}{4}$, $z = (l + a) \frac{\pi}{6}$. Цифрою 4 позначені результати 2D моделювання.

Як і раніше, ці результати продемонстрували, що значення зміни рівня ґрунтових вод, отримані при 3D моделюванні, менші, ніж отримані в результаті розрахунків, проведених за двовимірною теорією. Таким чином, дані двовимірного моделювання також можна використовувати як верхню межу для оцінки зміни рівня ґрунтових вод.

На малюнку 4a дані отримані при $x = (l + a) \frac{\pi}{2}$ і різним значенням z ,

тоді як на малюнку 4b показані дані, отримані при $x = (l + a) \frac{\pi}{4}$.

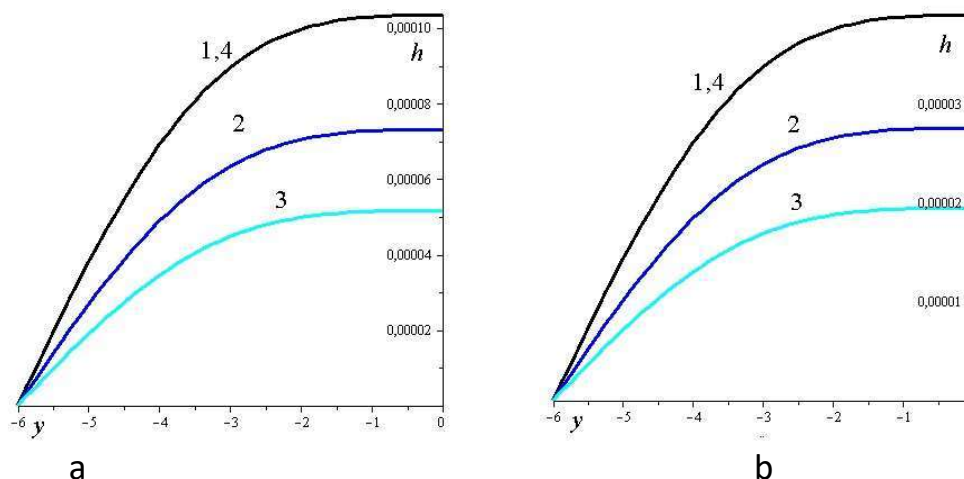


Рисунок 4.19 – Зміна РГВ зі змінною евапотранспірацією

Тривимірне моделювання зміни рівня ґрунтових вод, на відміну від двовимірного, дозволяє врахувати залежність евапотранспірації від наявності на поверхні ґрунту штучних покривів, які розташовані нерівномірно та мають різні коефіцієнти фільтрації та викликали відповідні зміни в міському рівні ґрунтових вод²¹⁰.

²¹⁰ Басманов О. Є., Говаленков С. В., Горбенко М. О. Вплив випадкових чинників на спалахування резервуарів з нафтопродуктами. *Прикладна геометрія та інженерна графіка. Праці Таврійська державна агротехнічна академія*. Мелітополь : ТДАТА, 2004. Вип. 4. Т. 26. С. 24–28 [279]; Шугайло О-р П., Рижов Д. І. Загальні принципи оцінки сейсмічної міцності сталевих опорних конструкцій обладнання і трубопроводів атомних станцій відповідно до нормативних вимог. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2021. № 4(92). С. 4-11. URL: [https://doi.org/10.32918/nrs.2021.4\(92\).01](https://doi.org/10.32918/nrs.2021.4(92).01) [280]; Шугайло О-р П., Білик С. І. Вплив зміни технологічних умов експлуатації сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблоків атомних станцій на їх сейсмічну міцність. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2022. № 1(93). С. 62–70. URL: [https://doi.org/10.32918/nrs.2021.1\(93\).07](https://doi.org/10.32918/nrs.2021.1(93).07) [281]; Гарбуз С. В., Халмурадов Б. Д. Розрахунок можливих екологічно шкідливих викидів в атмосферу із резервуарів з залишками нафтопродуктів. *Матеріали XIII міжнародної науково-технічної конференції «Авіа-2017»*. Національний авіаційний університет м. Київ. 2017. С. 787–793 [282]; Пузік С. О., Островський Б. О., Комар Д. А. Методика розрахунку процесу примусової вентиляції резервуарів від залишків рідких 157 нафтопродуктів. *Вісник Національного авіаційного університету*. 2013. № 2. С. 109–113 [283]; Гарбуз С. В., Ликов О. М. Дослідження техногенної та екологічної безпеки процесу рекуперації нафтопродуктів. *Тези доповідей VII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист»*. (Черкаси, 20-21 жовт. 2017 р.). 2017. С. 149–151 [284];

Більш точні моделі зміни рівня ґрунтових вод у часі в одновимірних нестационарних випадках були розроблені для запобігання повеням і більш ефективної системи управління рівнем ґрунтових вод. Подруге, розроблена авторкою тривимірна математична модель моделювання змін рівня ґрунтових вод враховує техногенні та природні фактори. Сформульовано граничні умови 3D математичного моделювання. Уточнено аналітичний розв'язок диференціальних рівнянь фільтрації за допомогою комп'ютерної програми Maple для створення моделі зміни рівня ґрунтових вод.

Результати тривимірного моделювання включають параметри в різних областях і показали нижчий підйом рівня ґрунтових вод, ніж результат розрахунку, отриманий відповідно до 2D теорії. Тому дані 2D-моделювання можуть бути застосовані як верхня межа для оцінки змін рівня ґрунтових вод, а 3D-моделювання дає більш точну оцінку²¹¹.

Гавадзин Н. О. Природно-техногенні процеси та економічні збитки від шкідливих впливів нафтогазових підприємств на навколишнє середовище. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2010. № 1. С. 125–130 [285].

²¹¹ Лущик А. В., Шwirло М. І., Лущик А. А., Парак Т. Ю. Основні положення щодо удосконалення системи моніторингу при підтопленні територій. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2003. № 6. С. 33–37 [83]; Sesetyan, K., Stucchi, M., Castelli, V., Gomez Capera, A. A. Kahramanmaras Gaziantep Türkiye M7.7 Earthquake, 6 February 2023 (04:17 GMT+03:00). Large historical earthquakes of the earthquake-affected region: a preliminary report. INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Italy. 2023. URL: <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/en/> [250]; Адаменко О. М., Адаменко Я. О., Яцишин Т. М. та ін. Екологічна безпека нафтогазового комплексу у західному регіоні. Колективна монографія за ред. проф. Я. О. Адаменка. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2017 [251]; Артемчук В. О., Попов О. О., Яцишин А. В., Кириленко Ю. О., Яцишин Т. М. Перспективи розробки математичних та програмних засобів перевірки екологічної ефективності прийняття управлінських рішень. Моделювання та інформаційні технології: зб. наук. пр. Ін-ту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. 2018. Вип. 85. С. 75–80 [252]; Бакулін Є. М., Яворський М. М., Світлицький В. М. та ін. Концепція системи управління охороною навколишнього середовища на об'єктах ДК 354 «Укргазвидобування» відповідно до вимог стандартів ISO 14000. Нафтогазова енергетика. *Всеукраїнський науково-технічний журнал*. 2007. № 1(2). С. 5–11 [253]; Венгерцев Ю. О. Концепція дослідження технічного стану сталевих резервуарів. *Нафтова і газова промисловість*. 2005. № 5. С. 53–55 [254]; Венгерцев Ю. О., Бугай В. Ю. Прогнозування технічного стану і залишкового

ресурсу експлуатації резервуарів. *Нафтова і газова промисловість*. 2005. № 6. С. 60–62 [255]; Витвицький Я. С., Кернична А. Є. Механізм державного управління в екологічній сфері на регіональному рівні та напрямки його вдосконалення. *Актуальні проблеми державного управління*. 2012. № 2 (42). С. 178–186 [256]; Козуля Т. В., Емельянова Д. І. Екологічний ризик на різних рівнях дослідження природно-техногенних систем, інформаційне забезпечення його оцінки. *Проблеми інформаційних технологій*. 2015. № 17. С. 138–144 [257]; Матвійчук Н. М., Сидорук С. В. Формування системи індикаторів екологічної безпеки України. *Сталий розвиток економіки*. 2018. № 38. С. 113–119 [258]; Степанюк Г. С. Особливості функціонування та проблеми управління техногенно небезпечними нафтогазовими підприємствами. *Науково-інформаційний вісник. Економіка*. 2015. № 11. С. 259–266 [259]; Адаменко Я. О., Архипова Л. М. Екологічна оцінка гідроекосистем Битківського нафтопромислу. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2010. № 4. С. 136–143 [260]; Адаменко Я. О. Оцінка впливів техногенно небезпечних об'єктів на навколишнє середовище. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2010. № 2. С. 58–63 [261]; Клюк Б. О., Семчук Я. М. Моделювання забруднення довкілля методом збурень при відмові магістральних нафтопроводів. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2003. № 1(5). С. 94–95 [262]; Кривенко Г. М., Семчук Я. М., Возняк М. П., Возняк Л. В. Вплив чинників на технічний ризик у ході експлуатації нафтопроводів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2008. № 4. С. 108–111 [263]; Демченко П. М., Рудько Г. І. Основні екологічні проблеми нафтогазового комплексу України. Матеріали науково-практичної конференції «Екологічні проблеми нафтогазового комплексу». 2003. Т. 23. С. 27 [264]; Побережний Л. Я. Вплив аварій нафтогазопроводів на довкілля. *Екологія и промышленность*. 2007. № 3 (12). С. 20–24 [265]; Дригулич П. Г. Еколого-геологічний моніторинг забруднення довкілля об'єктами нафтогазового комплексу : автореф. дис. ... канд. геол. наук: спец. 21.06.01 "Екологічна безпека" Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу. Івано-Франківськ, 2008. 19 с. [266]; Цайтлер М. Й. Заростання ділянок забруднених нафтопродуктами (на прикладі Бориславського нафтового родовища). *Дослідження, охорона та збагачення біорозмаїття*. Львів : УкрДЛТУ. 1999. С. 151–154 [267]; Бабаджанова О. Ф., Гринчишин Н. М., Сукач Ю. Г. Міграція нафти і нафтопродуктів у поверхневій шарі ґрунту при аварійних розливах. Безпека життя і діяльності людини – освіта, наука, практика: зб. 129 наук. праць X міжнар. наук.-метод. конф. Київ : Національний авіаційний університет. 2011. С. 22–26 [268]; Величко О., Терек О. Вплив нафтового забруднення ґрунту на вміст аскорбінової кислоти та активність аскорбатоксидази в органах рослин люцерни округлої. *Наук. вісн. ЛНАВМ ім. С. 3. Гжицького*. 2008. Т. 10, № 3. Ч. 2. С. 144–148 [269]; Величко О. І. Вміст

4.6. Прогнозування впливу техногенної сейсміки на стійкість резервуарів

За результатами досліджень, авторкою було розраховано підйом вільної поверхні в резервуарах різної форми при дії сейсмічного навантаження різної частоти, магнітуди та на різній відстані від епіцентру

нітратного азоту в ґрунті та органах рослин сої за умов забруднення ґрунту нафтою. *Науковий вісник НЛТУ України: збірник науково-технічних праць*. Львів : РВВ НЛТУ України. 2011. Вип. 21.16. С. 351–354 [270]; Джура Н. М., Цвілінюк О. М., Терек О. І. Вплив нафтового забруднення на вміст макро- та мікроелементів у рослинах *Carex hirta* L. *Укр. ботан. журн.* 2007. Т. 64, # 1. № С. 122–131 [271]; Панасенко Є. В. Вплив вуглеводнів нафти на зміну деяких водних показників чорноземного ґрунту. *Вісник ХНАУ. Ґрунтознавство*. 2008. № 2. С. 132–135 [272]; Стецишин В., Градович М., Подан І., Гальчук Р., Джура Н., Шевчик Л., Романюк О. Вплив нафтового забруднення ґрунту на ріст рослин *Helianthus annuus* L., *Fagopyrum esculentum* Moench. і *Linum usitatissimum* L. Молодь і поступ біології: збірник тез XII міжнар. наук. конф. студентів і аспірантів (м. Львів, 19-21 квітня 2016 р.). Львів, 2016. С. 176–177 [273]; Терек О. І., Величко О. І., Джура Н. М. Фізіологічні аспекти адаптації рослин до нафтозабрудненого ґрунту. *Фізіологія рослин: проблеми та перспективи розвитку: зб. наук. пр.* Київ : Логос. 2009. Т. 1. С. 217–225 [274]; Шевчик Л. З., Жак Т. В., Романюк О. І., Джура Н. М., Подан І. І., Гальчук Р. І. Дослідження латеральної міграції нафтової плями за участю тестових рослин. *Фундаментальні та прикладні дослідження в біології та екології*. Матер. IV міжнар. наук. конф. (м. Вінниця, 12-14 квітня, 2016 р.). Вінниця : ДРУК. 2016. С. 146–147 [275]; Петренко О. В., Скрипник В. І. Вплив сейсмічних навантажень на резервуари зберігання рідких вуглеводнів. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*. 2022. № 12 (1242). С. 114–121 [276]; Кулик А. В., Ткаченко С. М. Підвищення сейсмостійкості резервуарів для зберігання нафти та продуктів її переробки. *Науковий вісник НТУУ "КПІ"*. 2023. № 2 (108). С. 102–108 [277]; Зайцев Д. О., Скрипник О. Г. Розробка методів розрахунку сейсмостійкості резервуарів зрідженого природного газу. *Проблеми машинобудування*. 2023. № 2. С. 52–58 [278]; Басманов О. Є., Говаленков С. В., Горбенко М. О. Вплив випадкових чинників на спалахування резервуарів з нафтопродуктами. *Прикладна геометрія та інженерна графіка. Праці Таврійська державна агротехнічна академія*. Мелітополь : ТДАТА, 2004. Вип. 4. Т. 26. С. 24–28 [279]; Шугайло О-р П., Рижов Д. І. Загальні принципи оцінки сейсмічної міцності сталевих опорних конструкцій обладнання і трубопроводів атомних станцій відповідно до нормативних вимог. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2021. № 4(92). С. 4-11. URL: [https://doi.org/10.32918/nrs.2021.4\(92\).01](https://doi.org/10.32918/nrs.2021.4(92).01) [280].

землетрусу. Було також розраховано підйом вільної поверхні в резервуарах із використанням демпфуючих пристроїв. Дані прогнозу зміни підйому вільної поверхні в резервуарах представлені в таблиці 4.12.

Таблиця 4.12

Прогнозування впливу техногенної сейсміки на стійкість резервуарів

Частота сейсмічного навантаження, Гц	Магнітуда	Відстань до епіцентру землетрусу, м	Підйом вільної поверхні в резервуарі, м	Рівень заповнення резервуара, м	Тип резервуара	Демпфуючі пристрої
2	3	300	0,32	1	призматичний	немає
2	3	300	0,17	1	призматичний	немає
2	6	300	0,25	1	циліндричний	немає
2	6	200	0,4	1	циліндричний	немає
4	8	800	0,3	2	циліндричний	немає
4	4	200	0,011	2	циліндричний	немає
2	4	500	0,05 (0,25)	1	циліндричний	мембрана
2	6	200	0,2 (0,63)	1	циліндричний	мембрана
2	6	200	0,03 (0,55)	1	циліндричний	кільцева перегородка на висоті 0,8 м, $R_{отв}=0,5$ м

2	5	500	0,2 (0,45)	1	цилінд ричний	кільцева перегород ка на висоті 0,8 м, $R_{отв}=0,5$ м
2	3	500	0,02 (0,1)	1	цилінд ричний	кільцева перегород ка на висоті 0,6 м, $R_{отв}=0,5$ м

За допомогою демпфуючих пристроїв можливо зменшити коливання рідини в резервуарі на 20-30%, що дозволить безаварійно експлуатувати резервуари рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях до 5 балів та попереджувати розливи і потрапляння рідких вуглеводнів в навколишнє природне середовище та знижувати техногенне навантаження на довкілля.

4.7. Розробка методу підвищення рівня екологічної безпеки експлуатації резервуарів в умовах підвищення сейсміки

В роботі було проведено оцінку параметрів землетрусів, а саме їх частот, магнітуд та відстані резервуарів від до епіцентру землетрусу. Було проведено математичне моделювання динамічних характеристик оболонкових конструкцій, моделювання впливу демпфуючих пристроїв на рівень підйому рідини в резервуарі, а саме впливу внутрішніх горизонтальних і вертикальних перегородок, а також плаваючої мембрани. За допомогою демпфуючих пристроїв можливо зменшити коливання рідини в резервуарі на 20-30 %, що дозволить безаварійно експлуатувати резервуари рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях до 5 балів та попереджувати розливи і потрапляння рідких вуглеводнів в навколишнє природне середовище та знижувати техногенне навантаження на довкілля.

Було проведено оцінку впливу обводненості ґрунту на стійкість резервуару в умовах сейсмічної активності та доведено, що вплив техногенних факторів переважає природні фактори впливу на процеси обводнення та є істотним, може бути врахованим в системі управління екологічною безпекою процесу зберігання рідких вуглеводнів в резервуарах при сейсмічних навантаженнях. Це дозволить більш точно оцінювати та прогнозувати підвищення сейсмічної небезпеки у водонасичених ґрунтах в місцях розташування резервуарів зберігання рідких вуглеводнів.

Врахування результатів математичного моделювання впливу сейсміки на стійкість резервуарів дозволяє розробити метод підвищення екологічної безпеки експлуатації резервуарів в умовах підвищення сейсміки шляхом прогнозування впливу техногенної сейсміки на стійкість резервуара при різних параметрах ґрунтів основи, що дозволяє зменшити коливання рідини в резервуарі, що дозволить безаварійно експлуатувати резервуари рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях та знижувати техногенне навантаження на довкілля від впливу рідких вуглеводнів.

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА МЕТОДУ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ РЕЗЕРВУАРІВ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ НАНОМАТЕРІАЛІВ В КАРКАСІ РЕЗЕРВУАРУ

5.1. Пожежна небезпека статичної електрики в резервуарах

Рідкі вуглеводні здебільшого легкозаймисті та вибухонебезпечні, отруйні та шкідливі, внаслідок витоку легко спричиняють екологічні катастрофи, створюють серйозну загрозу життю людей та безпеці майна.

Пожежі на об'єктах нафтової промисловості часто мають стрімкий розвиток і затяжний характер, вони є надзвичайно небезпечними для працівників та рятувальників, які їх ліквідовують. Прикладом цього бути служили такі масштабні аварії, як вибух на найбільшому у Венесуелі нафтопереробному заводі «Атиау», який трапився 25 серпня 2012 року. Під час вибуху загинуло 48 осіб, 151 людина травмована. Пожежу гасили три дні, вона охопила три величезних нафтових резервуари. Інша катастрофа трапилась на одному з заводів мексиканської нафтової компанії «Петех» 19 вересня 2012 року. Вогонь за мить охопив завод. В результаті пожежі 30 людей загинуло, ще 126 травмовано²¹². З недавніх випадків – пожежа на

²¹² Про затвердження Правил пожежної безпеки в Україні НАКАЗ МВС України № 1417 від 30.12.2014 (редакція від 03.10.2017 р.) URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15/paran19> [164]; ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги», затверджений наказом Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 04.11.2016 № 297 [165]; ВБН В.2.2-58.1-94 Проектування складів нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа. Зі Зміною № 1 (затвердженою наказом Держнафтогазпрому України від 24.12.1999 № 136а) [166]; Soriano C., Tarazona S. F., Almeida M.C.F., Almeida M.S.S., Borges R. G. Selection of earthquake ground motion accelerograms for the continental margin of Southeastern Brazil. *DYNA*. 2021. Vol. 88 (217). P. 228-236 [167]; Ravnik J., Strelnikova E., Gnitko V., Degtyarev K., Ogorodnyk U. BEM and

FEM analysis of fluid–structure interaction in a double tank. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2016. Vol. 67. P. 13–25. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2016.02.006> [168];

Sivanandam S. N., Sumathi S., Deepa S. N. Introduction to Fuzzy Logic Using MATLAB, Springer, Berlin Heidelberg. 2007 [169]; Avramov K.V. Nonlinear modes of parametric vibrations and their applications to beams dynamics, *Journal of Sound and Vibration*. 2009. Vol. 322. P. 476–489. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.07.013> [170]; Vambol S., Vambol V., Suchikova Y., Deyneko N. Analysis of the ways to provide ecological safety for the products of nanotechnologies throughout their life cycle. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 1/10(85) (2017) P. 27–36. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.85847> [171]; Свиридов В. А., Присяжнюк В. В., Кухарішин С. Д., Якіменко М. Л. Деякі проблемні питання системи протипожежного захисту нафтопереробних підприємств. URL: <http://www.undicz.mns.gov.ua/news/162html> [172]; Бабенко Ю. В., Дудченко В. Г., Басаєв А. М., Савельєв І. В., Деревинський Д. М., Боровиков В. О., Антонов А. В. Протипожежний захист складів нафти і нафтопродуктів. *Оглядова інформація : УкрНДІПБ*, 2002. 142 с. [173]; Stevens C. J., Bell J.N.B., Brimblecombe P., Clark C. M., Dise N. B., Fowler D., Lovett G. M., Wolseley P. A. The impact of air pollution on terrestrial managed and natural vegetation: Air pollution impacts on vegetation. *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 2020. Vol. 378. 20190317 [174]; Wu D., Chen Z. Quantitative risk assessment of fire accidents of large-scale oil tanks triggered by lightning. *EFA*. 2016. Vol. 63. P. 172–181 [175]; Xie S., Dong S., Chen Y., Peng Y., Li X. A novel risk evaluation method for fire and explosion accidents in oil depots using bow-tie analysis and risk matrix analysis method based on cloud model theory. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2021. Vol. 215. 107791 [176]; Pouyakian M., Jafari M. J., Laal F., Nourai F., Zarei E. A comprehensive approach to analyze the risk of floating roof storage tanks. *Process Saf. Environ. Prot.* 2021, 146, 811–836 [177]; Zinke R., Melnychuk J., Köhler F., Krause U. Quantitative risk assessment of emissions from external floating roof tanks during normal operation and in case of damages using Bayesian Networks. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2020. № 197. S. 2–12 [178]; Bouafia A.; Bougofa M.; Rouainia M.; Medjram M.S. Safety Risk Analysis and Accidents Modeling of a Major Gasoline Release in Petrochemical Plant. *J. Fail Anal. Prev.* 2020. Vol. 20. P. 358–369 [179]; Бредун В. І. Управління екологічною безпекою сейсмотехнонавантаженого регіону : дис. ... канд. техн. наук: 21.06.01. Кременчук : Крем. Нац. ун-т. ім. Михайла Остроградського, 2011. 191 с [180].; Люта, Н., Петрочко, В. Визначення максимального рівня заповнення вертикального резервуара з врахуванням дії сейсмічних навантажень. *Збірник наукових праць ЛОГОС*. 2020. Р. 46–48. URL: <https://doi.org/10.36074/11.12.2020.v2.13> [181].

нафтохімічному заводі Deer Park (Техас, США), яка трапилась 17 березня 2019 року і тривала 4 дні, в результаті чого було знищено десять резервуарів. Експерти оцінили збиток у розмірі близько 1 млрд доларів США²¹³. Варто також згадати сумнозвісну пожежу на нафтобазі у Васильківському районі – масштабна техногенна катастрофа, спричинена вибухом і подальшим займанням нафтопродуктів на нафтобазі біля села Крячки Васильківського району Київської області, що почалася 8 червня 2015 року. Про ліквідацію пожежі було оголошено аж 20 червня. Пожежа становила серйозну небезпеку, оскільки поруч розташована військова частина з бойовим арсеналом. Внаслідок пожежі на нафтобазі загинуло шестеро осіб, із них троє – рятувальники, ще принаймні 18 осіб травмовано²¹⁴.

Пожежі нафти і нафтопродуктів у резервуарах, як правило, є складними і масштабними, ліквідуються з великими труднощами, наносять велику шкоду і часто приводять до загибелі людей. Як свідчить статистика, в США в резервуарних парках щорічно виникає 20 пожеж, у Японії щорічно виникає по одній пожежі²¹⁵. Статистика свідчить про

²¹³ Ковалишин В. В., Кирилів Я. Б., Гусар Б. М., Войтович Т. М., Ковалишин Вол. В., Корнієнко А. О., Чернецький В. В. Перспективи гасіння пожеж водопінними вогнегасниками. *Пожежна безпека*. 2017. Vol. 31. P. 49–58 [182].

²¹⁴ Там само [182].

²¹⁵ Less F.P. Loss prevention in the process industries. Elsevier. 497 p. [183]; Person H., Lonnermark A. Tank fire review of fire incidents 1951-2003. Brandforsk Project 513-021. Borås: Swedish National Testing and Research Institute. 2004 [184]; Casal J. Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants. *Industrial Safety Series*. 2008. V. 8. 117 p. [185]; Shen G.B. (2020) A Study on the Causes and Sustainability of The U.S. Trade Deficit --A Review of the Study on the U.S. Trade Deficit. *Journal of Changsha University of Science and Technology (Social Science Edition)*. 2020. Vol. 35(06). P. 105–110 [186]; Zhang Q. L. Typical Fire cases of Oil storage tanks at home and abroad. Tianjin University Press, Tianjin. 2014 [187]; Yuan C., Cui H., Tao B., Ma S. (2018). Cause factors in emergency process of fire accident for oil–gas storage and transportation based on fault tree analysis and modified Bayesian network model. *Energy & Environment*. 2018. Vol. 29(5). P. 802–821. URL: <https://www.jstor.org/stable/90023925> [188]; Li L., Dai L. Review on fire explosion research of crude oil storage tank. *E3S Web Conf. ICERSD 2020*. 2021. Vol. 236. 01022. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123601022> [189]; Chang J.I. et al. A study of storage tank accidents. *Journal of Loss Prevention in The Process Industries*. 2006. Vol. 19. P. 51-59 [190]; Tauseef S. M., Abbasi T., Pompapathi V., Abbasi S. A. Case studies of 28 major accidents of fires/explosions in storage tank farms in the backdrop of available codes/standards/models for safely configuring

такий розподіл пожеж: на об'єктах «Головтранснафти» – 9,7%, на нафтопромислах – 14,2%, на нафтопереробних заводах – 28,4%, на розподільних нафтобазах – 47,7 %²¹⁶. В наземних резервуарах сталося 93,4 % пожеж, причому 32,1 % з них мали місце в резервуарах з сировою нафтою, 53,9 % – в резервуарах з бензином, 14,0 % – в резервуарах з іншими нафтопродуктами (мазут, гас тощо). Пожежі відбувалися в основному у вертикальних сталевих резервуарах (227 випадків), з них 198 випадків (87,2 %) припадають на резервуари з бензином та сировою нафтою²¹⁷.

Шен Гогуан та ін.²¹⁸ провели велику кількість досліджень причин виникнення пожеж у побутових резервуарах і виявили, що пожежі,

such tank farms, *Process Safety and Environmental Protection*. 2018. Vol. 120. P. 331-338. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pseP.2018.09.017> [191]; Губар К., Пономаренко Р. Деякі питання безпеки праці під час гасіння пожеж при горінні нафтопродуктів у резервуарах. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції. Черкаси : ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2023. С. 19–20 [192]; Paula H. M. Insights from 595 tank farm fires from around the world. *Process Safety and Environmental Protection*. 2023. Vol. 171. P. 773–782. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pseP.2023.01.058> [193]; Paula H. M. Insights from 665 tank farm fires – The second database update Galvani Risk Consulting, LLC. The Woodlands, TX, United States. 2023. Vol. 42. Is. 3. P. 523–536. URL: <https://doi.org/10.1002/prs.12475> [194]; Doregar Zavareh R, Dana T, Roayaei E, Monavari SM, Jozi SA. The Environmental Risk Assessment of Fire and Explosion in Storage Tanks of Petroleum Products. *Sustainability*. 2022. Vol. 14(17). 10747. URL: <https://doi.org/10.3390/su141710747> [195]; Gant S., Bettis R., Santon R., Buckland I., Bowen P., Kay P. Generation of flammable mists from high flashpoint fluids: Literature review”, Health and Safety Executive, (2013). Health and Safety Executive, Research Report RR980. URL: <http://www.hse.gov.uk/research/rrhtm/rr980.htm> [196]; Guidelines for Seismic Evaluation and Design of Petrochemical Facilities/Committee on Seismic Evaluation and Design of the Petrochemical Committee of the Energy Division of the American Society of Civil Engineers. Reston, VA: American Society of Civil Engineers. 2011. 363 p. [197].

²¹⁶ Там само 183]; [184]; [185]; [186]; [187]; [188]; [189]; [190]; [191]; [192]; [193]; [194]; [195]; [196]; [197].

²¹⁷ Бабенко Ю. В., Дудченко В. Г., Басаєв А. М., Савельєв І. В., Деревинський Д. М., Боровиков В. О., Антонов А. В. Протипожежний захист складів нафти і нафтопродуктів. *Оглядова інформація : УкрНДІПБ*, 2002. 142 с. [173].

²¹⁸ Shen G.B. (2020) A Study on the Causes and Sustainability of The U.S.

спричинені відкритим вогнем, становлять 52,4 % від загальної кількості аварій, займаючи перше місце. Крім того, блискавка та статична електрика становлять близько 10%, що також є важливою причиною пожежі; інші зовнішні причини, такі як неправильна робота персоналу та виникнення іскор, становлять близько 30 % від загальної кількості нещасних випадків.

Згідно з великомасштабним дослідженням пожежі в атмосферних резервуарах, спільно проведеним 16 нафтовими компаніями, включаючи BP і Shell²¹⁹, щороку відбувається 15-20 аварій із пожежею великих резервуарів з рідкими вуглеводнями²²⁰.

Досить часто серйозні аварії ініціюються в надземних або «атмосферних» резервуарах для зберігання, які можуть зазнати втрати утримання через низку причин. Згідно з Chang і Lin²²¹, удар блискавки є найпоширенішою причиною несправності атмосферного резервуара, на яку припадає одна третина всіх таких аварій. Іншими причинами, у порядку зменшення частоти, є помилка технічного обслуговування, експлуатаційна помилка, саботаж, несправність обладнання, тріщини та розриви, статична електрика, витік і розрив лінії, відкрите вогонь, стихійні лиха, такі як землетруси та урагани, а також реакція на потік²²². Згідно з Kletz (1999), «жоден елемент обладнання не залучається до більшої кількості аварій, ніж резервуари для зберігання, ймовірно, через те, що вони крихкі та легко пошкоджуються невеликим надлишковим тиском або вакуумом». Усі минулі звіти про аналіз аварій підтверджують це²²³.

Trade Deficit --A Review of the Study on the U.S. Trade Deficit. *Journal of Changsha University of Science and Technology (Social Science Edition)*. 2020. Vol. 35(06). P. 105–110 [186].

²¹⁹ Li Y., Zhang G., Wang H., et al. Monitoring of groundwater level changes and its relationship with tectonic activities in the North China Plain. *Engineering Geology*. 2023. Vol. 282. P. 106135 [161]; Zhang Q. L. Typical Fire cases of Oil storage tanks at home and abroad. Tianjin University Press, Tianjin. 2014 [187].

²²⁰ Li L., Dai L. Review on fire explosion research of crude oil storage tank. *E3S Web Conf. ICERSD 2020*. 2021. Vol. 236. 01022. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123601022> [189].

²²¹ Chang J.I. et al. A study of storage tank accidents. *Journal of Loss Prevention in The Process Industries*. 2006. Vol. 19. P. 51-59 [190].

²²² Там само [190].

²²³ Tauseef S. M., Abbasi T., Pompathi V., Abbasi S. A. Case studies of 28 major accidents of fires/explosions in storage tank farms in the backdrop of available

Кількість пожеж, що виникають у резервуарах зберігання рідких вуглеводнів, порівняно невелика і становить менше ніж 15 % від пожеж, що мають місце на об'єктах хімії та нафтохімії. Однак це найбільш складні пожежі, що становлять небезпеку для комунікацій, суміжних споруд, а також для учасників гасіння таких пожеж. Небезпека цих пожеж обумовлена можливістю рідин розтікатися на великій площі з швидкістю поширення полум'я²²⁴.

Через масштабну переробку сирової нафти, бензину, інших видів рідкого палива та зріджених під тиском вуглеводнів у всьому світі 97 % усіх несправностей резервуарів для зберігання пов'язані з легкозаймистими хімікатами. Експлуатаційна помилка, що призводить до переповнення; несправність обладнання, наприклад, блокування випускного клапана, яке сталося на Фейзіні, або поява тріщин або розривів в резервуарах або приєднаних трубопроводах – усе це може призвести до випадкового викиду легкозаймистих рідин. Якщо такі розливи не локалізувати та не контролювати негайно, вони призведуть до реактивних/спалахових пожеж або вибухів хмари пари, які потім викликать нові пожежі та/або вибухи, посилюючи первинну аварію до катастрофічного рівня. Жахливі інциденти, які сталися в резервуарах для зберігання або трубопроводах, що з'єднують їх, у Фейзіні в 1966 році, Мехіко в 1984 році, Сибірі в 1989 році, Вішакхапатнамі в 1997 році, Бансфілді в 2005 році та Джайпурі в 2009 році є прикладами цього явища. Удари блискавки та інші тригери, які можуть запалити пари всередині резервуару, можуть призвести до вибуху резервуару, а пожежа та/або розгойдування фрагментів розбитого резервуару можуть призвести до виходу з ладу сусідніх резервуарів. Ця тенденція спричиняє каскад аварій, або «внутрішній ефект доміно», значно підвищує ризик, який становлять великі резервуари, що зберігають легкозаймисті хімікати.

codes/standards/models for safely configuring such tank farms, Process Safety and Environmental Protection. 2018. Vol. 120. P. 331-338. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pseP.2018.09.017> [191].

²²⁴ Губар К., Пономаренко Р. Деякі питання безпеки праці під час гасіння пожеж при горінні нафтопродуктів у резервуарах. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції. Черкаси : ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2023. С. 19–20 [192].

В роботах²²⁵ систематизовано і оцінено існуючі коди, стандарти та моделі для прийняття рішення про те, як розмістити два або більше резервуарів для зберігання легкозаймистих хімікатів таким чином, щоб випадкова пожежа або вибух в одному з резервуарів не пошкоджує довколишній резервуар(и) і не викликає вторинних або третинних аварій. Усі галузі промисловості в усьому світі дотримуються – або, як очікується, дотримуються – одного з цих кодексів, стандартів або моделей.

Незважаючи на керівні принципи, створені переважачими кодексами, стандартами чи моделями, великі аварії продовжують відбуватися, коли аварія в одному з резервуарів для зберігання РВ призводить до виходу з ладу інших резервуарів, тим самим посилюючи початкову аварію і екологічну небезпеку для довкілля²²⁶.

В роботі²²⁷ представлені деякі висновки, отримані в результаті дослідження даних про пожежі на резервуарних парках з усього світу, де зберігаються різні продукти від матеріалів з низькою температурою спалаху до сирих і важких вуглеводнів. Інциденти та інформація в базі даних надійшли з понад 130 джерел, переважно загальнодоступних, включаючи технічні та новинні звіти. На момент підготовки цієї статті база даних містила 595 пожежних інцидентів, і це дослідження вже підтримало аналіз надійності системи протипожежного захисту води, ідентифікацію небезпеки та оцінку ризику для кількох резервуарних парків. База даних містить таку пропорційну кількість інцидентів з пожежами, які, як повідомляється, включали пожежу в басейні в межах дамби/насипу, а іноді й за її межами, а також пропорційну кількість пожеж для кожного типу матеріалу²²⁸:

- Матеріали з низькою температурою спалаху = $60/268 = 22 \%$
- Матеріали з високою температурою спалаху = $27/95 = 28 \%$

²²⁵ Tauseef S. M., Abbasi T., Pompapathi V., Abbasi S. A. Case studies of 28 major accidents of fires/explosions in storage tank farms in the backdrop of available codes/standards/models for safely configuring such tank farms, *Process Safety and Environmental Protection*. 2018. Vol. 120. P. 331-338. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pseP.2018.09.017> [191].

²²⁶ Там само [191].

²²⁷ Paula H. M. Insights from 595 tank farm fires from around the world. *Process Safety and Environmental Protection*. 2023. Vol. 171. P. 773–782. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pseP.2023.01.058> [193].

²²⁸ Там само [193].

- Більш важкі матеріали = $57/232 = 25 \%$
- Усі матеріали разом = $144/595 = 24 \%$ ²²⁹.

Тому актуальним є дослідження та покращення характеристик матеріалів резервуарів для зберігання рідких вуглеводнів, що зазнають сейсмічних впливів для зменшення техногенного впливу на довкілля від рідких вуглеводнів²³⁰.

Резервуари для зберігання на нафтопереробних і хімічних заводах містять великі об'єми статичного накопичення легкозаймистих рідин.

Як правило, стаціонарні або мобільні та виготовлені з великих металевих контейнерів, резервуари для зберігання відрізняються за розміром, конструкцією та дизайном, від вертикальних і горизонтальних до відкритих і закритих верхів, і це лише деякі з них. Одне можна сказати напевно: ризик електростатичного розряду залишається постійною та невидимою загрозою в промислових нафтових небезпечних зонах.

Більшість обладнання технологічних установок, що піддається ризику накопичення статичного заряду, виготовляється з металу. Метали є чудовими провідниками, а природні провідні властивості металів, від міді до сталі, означають, що електричний опір перенесенню зарядів від тіла є низьким за умови, що тіло має хороший контакт із землею. Однак ця позитивна характеристика може швидко стати негативною, якщо металевий корпус не заземлено, оскільки ізольовані металеві провідники є основним джерелом небезпеки статичного займання. Коли ви маєте справу з металевими об'єктами, такими як резервуари для зберігання, оскільки вони переважно виготовлені зі сталі, вони віддадуть більшу частину своєї енергії розряду в одну запалювальну іскру, здатну вивільнити достатньо енергії, щоб запалити легкозаймисті пари.

Зазвичай нафтопереробні заводи мають зону зберігання продуктів або «резервуарний парк», який забезпечує ємність для

²²⁹ Paula H. M. Insights from 665 tank farm fires – The second database update Galvani Risk Consulting, LLC. The Woodlands, TX, United States. 2023. Vol. 42. Is. 3. P. 523–536. URL: <https://doi.org/10.1002/prs.12475> [194].

²³⁰ Doregar Zavareh R, Dana T, Roayaei E, Monavari SM, Jozi SA. The Environmental Risk Assessment of Fire and Explosion in Storage Tanks of Petroleum Products. *Sustainability*. 2022. Vol. 14(17). 10747. URL: <https://doi.org/10.3390/su141710747> [195].

зберігання для забезпечення безперебійної роботи нафтопереробного заводу. Незважаючи на те, що резервуари для зберігання, розташовані всередині периметра, розташовані в межах кордону, а потім і протипожежної стіни, вони часто розташовані в безпосередній близькості, на відстані кількох метрів один від одного. Їх розташування має відповідати мінімальним рекомендованим відстаням поділу, і, хоча це залежить від різних факторів, воно в першу чергу визначається ємністю резервуара.

Як зазначено Управлінням охорони здоров'я та безпеки (HSE), ці відстані навряд чи забезпечать повний захист у разі пожежі чи вибуху, пов'язаного з резервуаром, але «повинні дати достатньо часу для евакуації людей, якщо є адекватні засоби Втеча». Хоча жоден інцидент ніколи не можна вважати нешкідливим, те, що може початися як пожежа одного резервуара для зберігання, може швидко перерости та поширити ланцюгову реакцію по всьому об'єкту, що може призвести до серйозних фінансових втрат, не кажучи вже про перерву у виробництві та потенційну втрату людей. Тому слід розглянути подвійний підхід; по-перше, щоб зрозуміти потенційні джерела займання в небезпечних зонах, а по-друге, щоб потім застосувати заходи та стандартні робочі процедури для пом'якшення такого інциденту.

Вироблення статичної електрики під час очищення резервуарів для зберігання нафти можна зменшити, дотримуючись певних процедур.

Вибухи резервуарів відбувалися там, де ймовірна причина не була встановлена, але статична електрика була ідентифікована як потенційне джерело займання. У деяких випадках вказувалося на погане дотримання безпечних процедур, але це не було доведено як причину. Постійне виникнення цих аварій свідчить про більшу структуру недоліків у безпеці експлуатації. Електростатичний розряд давно відомий як небезпека, пов'язана з нафтопродуктами, і цей інцидент підкреслює серйозність статички як джерела займання та вплив, який він може мати на те, що можна вважати рутинним завданням, таким як очищення резервуарів. Результати дослідження аварій резервуарів для зберігання представлені в Таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Дослідження аварій резервуарів для зберігання. На основі 242 аварій на промислових об'єктах за останні 40 років²³¹.

Рік	1960-1969	1970-1979	1980-1989	1990-1999	2000-2003	Всього
Блискавка	4	10	19	37	10	80
Технічне обслуговування / гарячі роботи	1	5	9	12	5	32
Операційна помилка	1	5	6	8	9	29
Несправність обладнання	3	1	5	7	3	19
Саботаж	2	5	2	6	3	18
Тріщина / розрив	0	3	3	3	8	17
Витік і розрив лінії	0	3	2	5	5	15
Статична електрика	2	1	2	2	5	12
Відкритий вогонь	1	0	4	2	1	8
Природна катастрофа	1	2	1	1	2	7
Реакція втечі	2	1	0	2	0	5
Всього	17	36	53	85	51	242

Розподіл причин виникнення пожеж на резервуарах представлений на рисунку 5.1.

²³¹ Chang J.I. *et al.* A study of storage tank accidents. *Journal of Loss Prevention in The Process Industries*. 2006. Vol. 19. P. 51-59 [191].



Рисунок 5.1 – Розподіл причин виникнення пожеж на резервуарах

Характер операцій з очищення резервуарів означає, що генерація статичної електрики накопичується через бризки на поверхню резервуара. Завжди слід враховувати накопичений заряд, пов'язаний з миттям водою, і очікується, що він буде набагато вищим, якщо використовуються хімічні засоби для чищення. Зупинка накопичення статички має вирішальне значення під час усіх операцій миття резервуару через інтенсивне перемішування залучених рідин. У цьому випадку вплив струменя води під високим тиском, який використовується для очищення та видалення відкладень з поверхні, випадково створив дрібний електростатично заряджений туман у просторі резервуару, який запалився статичним розрядом.

Термін «туман» використовується тут узагальнено для опису сукупності крапель рідини, зважених у газовому середовищі.

Зазвичай він відрізняється від розпилювань тим, що має менший імпульс і поводить себе більше як спокійна хмара. У контексті пожежогасіння зазвичай передбачається, що водяний туман складається з менших крапель, ніж бризки води²³².

²³² Gant S., Bettis R., Santon R., Buckland I., Bowen P., Kay P. Generation of

Тумани, які утворюються під час миття водою (або потенційно від введення пари), можуть стати електростатичними. У цьому інциденті виник заряд, і заряд водяного туману, утвореного під час миття бака, створив електростатичне поле по всьому баку. Коли між двома провідниками, зануреними в туман із дрібних крапель, генерується іскра, температура швидко зростає в невеликому, приблизно сферичному, об'ємі газу та крапель, відомому як ядро іскри.

У цьому об'ємі будь-які краплі палива швидко випаровуються, і пари палива швидко змішуються з навколишнім повітрям. Оскільки температура висока, швидкість реакції, як правило, надзвичайно висока, і пари палива майже перетворюються на продукти згоряння, виділяючи тепло в процесі.

На мінімальну енергію запалювання (MIE), необхідну для створення саморозповсюджуваного полум'я в тумані, впливає низка факторів – найбільш важливими з них є розмір краплі, а також концентрація палива, летючість, швидкість повітря та наявність будь-якої пари палива. також важливо. Спреї, отримані випуском рідини під тиском через сопло, зазвичай складаються з більших крапель. Тиск будь-якої пари зменшує MIE туману. Зі збільшенням леткості палива кількість енергії, необхідної для випаровування крапель, зменшується, і, отже, для запалювання потрібно менше енергії.

Заряджений туман часто присутній протягом процесу очищення, і може знадобитися кілька годин, щоб повністю розслабитися. Властивості самого матеріалу є фундаментальними для розуміння як генерації заряду, так і релаксації. Чим нижче провідність, тим більше час релаксації.

Розслідування інциденту показало, що ризик був неправильно оцінений «мулом», і був класифікований залученими сторонами як безпечний. Як наслідок, заходи, які складали очищення резервуарів, не були заплановані як такі високоризикові. Було також зазначено, що в день інциденту було особливо спекотно, що могло призвести до розпилення (перетворення рідини на тонкий спрей/туман), що відбувалося з великою швидкістю, яка інакше не відбулася б за нормальних умов навколишнього середовища. Оскільки заземлення не було, заряд міг вільно накопичуватися, а це означало, що резервуар був

flammable mists from high flashpoint fluids: Literature review”, Health and Safety Executive, (2013). Health and Safety Executive, Research Report RR980. URL: <http://www.hse.gov.uk/research/rrhtm/rr980.htm> [196].

не лише ізолюваним компонентом, але й містив велику кількість статичної електрики. Накопичення електростатичного заряду врешті-решт розвинеться достатньо, щоб розрядити іскру на об'єкті, який має інший потенціал, намагаючись вирівняти заряд.

Отже, це означало, що інцидент мав усі ознаки для виникнення займання:

- Паливо – «шлам» (нафтовий залишок)

- Атмосферні умови (гарячий горючий/займистий атмосфера)

- Незаземлений накопичувальний резервуар (ізолюваний від землі)

- Джерело займання (статична електрика)

- Незаземлений провідник (шланг і оператор)

Завжди настійно рекомендується проактивний підхід до встановлення відповідного рішення для заземлення та з'єднання. Цілком можливо, що цей інцидент підкреслив поточні підводні камені з операціями з очищення резервуарів, і аналогічним чином попередні операції могли відбутися без видимого електростатичного займання.

Швидкість генерації заряду, як відомо, важко передбачити, і єдиний спосіб контролювати це – застосувати заходи статичного контролю, щоб зменшити потенційний ризик електростатичного займання. Згенерований заряд стає проблемою лише у небезпечних зонах, коли йому дозволяється накопичуватися на об'єктах, які не знаходяться під потенціалом землі. Найважливіша дія, яку оператор може вжити для контролю статичної електрики, – це переконатися, що будь-які провідні об'єкти підключені до перевіреного заземлення. Ті, хто ігнорує небезпеку електростатичного розряду в небезпечних середовищах, загрожують як людям, так і заводу.

Огляд літератури щодо зареєстрованих аварій (Santon, 2009) показав, що наслідки вибухів туману можуть бути потенційно дуже серйозними. Дослідження виявило 37 інцидентів, у тому числі 20 вибухів, 9 з яких разом спричинили 29 смертельних випадків²³³.

Оптимальним рішенням є надання операторам візуальних засобів перевірки з'єднання з обладнанням із ризиком накопичення статичного заряду з опором 10 Ом або менше, як зазначено в стандарті

²³³ Там само [196].

IEC TS 60079-32-1 «металевий предмет, що добре контактує з землею повинна мати опір менше 10 Ом».

Ризики займання можуть виникати різними способами, і статична електрика під час операцій з очищення резервуарів є лише одним із прикладів. Важливо розуміти способи виникнення ризиків і запобіжні заходи, необхідні для забезпечення безпечного робочого середовища.

Незважаючи на постійну небезпеку, завдяки зменшенню заряду та потенціалу для неконтрольованого електростатичного розряду, викликане займанням усувається. Основним завданням має бути пошук рішення заземлення, яке забезпечує найкращий рівень захисту та яке можна використовувати разом із поточними операціями. Чим більше рівнів захисту розгорнуто для захисту від джерела займання, тим більша ймовірність того, що статика буде контролюватися безпечним, повторюваним і надійним способом день у день.

5.2. Нейтралізація статичної електрики в резервуарах зберігання рідких вуглеводнів

Резервуари призначені для приймання, зберігання, відпуску, обліку нафти і нафтопродуктів і є відповідальними інженерними конструкціями. Елементи резервуарів в експлуатаційних умовах зазнають значних змін температурних режимів, підвищений тиск, вібрацію, сейсмічні навантаження²³⁴, нерівномірні осідання, корозію.

²³⁴ Guidelines for Seismic Evaluation and Design of Petrochemical Facilities/Committee on Seismic Evaluation and Design of the Petrochemical Committee of the Energy Division of the American Society of Civil Engineers. Reston, VA: American Society of Civil Engineers. 2011. 363 p. [197]; Kovalov A., Otrosh Y., Rybka E., Kovalevska T., Togobytska V., Rolin I. Treatment of Determination Method for Strength Characteristics of Reinforcing Steel by Using Thread Cutting Method after Temperature Influence. In Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd. 2020. Vol. 1006. P. 179–184 [198]; Surianinov M., Andronov V., Otrosh Y., Makovkina T., Vasiukov S. Concrete and fiber concrete impact strength. *Materials Science Forum*. 2020. 1006 MSF. P. 101–106 [199]; Sun Y., Zhou D., Wang J. An equivalent mechanical model for fluid sloshing in a rigid cylindrical tank equipped with a rigid annular baffle. *Applied Mathematical Modelling*. 2019. Vol. 72. P. 569–587 [200]; Zhou D., Wang J. D., Liu W. Q. Nonlinear sloshing of liquid in rigid cylindrical container with a rigid annular baffle: free vibration. *Nonlinear Dynamics*. 2014. Vol. 78(4), P. 2557–2576 [201]; Sierikova O., Koloskov V., Degtyarev K.,

Найважливішою на сьогоднішній день залишається проблема забезпечення надійності експлуатації та безаварійності роботи систем зберігання нафти. Однією з основних причин виникнення вибухів і пожеж в нафтосховищах (резервуарах) є заряди статичної електрики, що утворюються в трубопроводі в процесі транспортування нафти. В результаті вносяться разом з нафтою в резервуар електростатичні заряди, що створюють електричне поле і відповідно умови для виникнення іскрового пробою газового простору над поверхнею нафти. Питання виникнення статичної електрики вимагають ретельних досліджень і обґрунтування впровадження нових конструкцій і матеріалів при транспортуванні і зберіганні нафтопродуктів. Утворення електричних зарядів в нафтопродуктах при їх русі називається електризацією. Електричні заряди, які знаходяться в обсязі або на поверхні нафтопродуктів, називаються електростатичними. Найбільш сильно електризація проявляється при високих швидкостях транспортування по трубах. Значимість процесів накопичення електростатичних зарядів особливо велика, оскільки матеріалами що електризуються є легкозаймисті рідини. Розряди статичної електрики в легкозаймистих середовищах можуть ставати причиною вибухів і пожеж.

Існує велика небезпека розрядів статичної електрики і нанесення збитку в нафтовій та нафтопереробній галузях. Тому розробка заходів запобігання і усунення небезпечних проявів статичної електрики є досить актуальною проблемою. З урахуванням підвищення вимог до захисту від статичної електрики у виробництвах хімічної, нафтохімічної та нафтопереробної промисловості, а також з урахуванням зростання обсягу транспортування та зберігання нафти і нафтопродуктів виникає

Strelnikova E. Improving the Mechanical Properties of Liquid Hydrocarbon Storage Tank Materials. *Materials Science Forum*. 2022. Vol. 1068. P. 223–229. DOI: 10.4028/p-888232 [202]; Kushch V. I. Stress field and effective elastic moduli of periodic spheroidal particle composite with Gurtin-Murdoch interface. *International Journal of Engineering Science*. 2018. Vol. 132. P. 79–96. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2018.08.001> [203]; Gnitko V., Degtyariov K., Naumenko V., Strelnikova E. BEM and FEM analysis of the fluidstructure interaction in tanks with baffles, *Int. Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. 2017. Vol. 5 (3). P. 317–328. URL: <https://doi.org/10.2495/CMEM-V5-N3-317-328> [204].

необхідність систематичного дослідження і розробки методів, що знижують інтенсивність електризації нафти і нафтопродуктів.

Як показує статистика і численні дослідні роботи можливе накопичення небезпечних кількостей електростатичних зарядів в резервуарах, що призводить до виникнення напруженості електричного поля, яка перевищує критичну величину 3 кВ/мм в результаті чого створюються умови для іскроутворення і, відповідно, вибуху і пожежі. Тому розробка принципово нових і більш ефективних способів нейтралізації електростатичних зарядів в потоці нафти є важливою науково-технічною задачею.

При оцінці масштабів можливих техногенних небезпек на нафтобазах та нафтоховищах були виділені основні сценарії розвитку аварій:

- найбільш небезпечні: вибух наземного резервуара з нафтою з подальшим займанням, пожежею і повним руйнуванням резервуара;
- найімовірніші: часткове руйнування насосного агрегату, локальні витoki з технологічного обладнання та трубопроводів.

При розвитку аварій за цими сценаріями, можливо займання нафти (нафтопродукту) і пожежа протоки. Основними вражаючими факторами перерахованих аварій є теплове випромінювання, дія ударної хвилі, потрапляння у відкрите полум'я, ураження осколками. При аваріях з найбільш важкими наслідками зони ураження (руйнування) можуть досягати декількох сотень метрів; розмір небезпечних зон при виникненні пожежі розлиття буде обмежений кількома десятками метрів від краю протоки. У разі реалізації розглянутих аварійних ситуацій можливе руйнування суміжного по проммайданчику обладнання. Ця обставина сприяє збільшенню площі зони ураження.

Виникнення статичної електрики може призвести до накопичення дуже великого заряду і, врешті-решт, до розряду у вигляді іскри, що в пожежонебезпечному і тим більше у вибухонебезпечному середовищі може бути причиною пожежі (вибуху), так як для займання вибухонебезпечної суміші парів легкозаймистих речовин з повітрям досить різниці потенціалів електростатичного заряду в 300-500 В.

Компанія Hyperion Catalyst (Кембридж, США) удосконалила метод отримання нанотрубок і сьогодні 60 % американських автомобілів оснащені бензопроводами, що містять вуглецеві нанотрубки. За рахунок своєї високої електропровідності вони

нейтралізують статичні заряди, які можуть породити іскру в бензопроводі. Сьогодні нанотрубки активно впроваджують і в тару - наприклад в коробки для перевезення мікросхем. Вони оберігають електронні пристрої від механічних пошкоджень, знімають електростатичні заряди здатні зіпсувати чіпи.

Введення нанотрубок в якості наповнювача надає деяким композиційним матеріалам електропровідності та інших важливих властивостей. Електропровідні пластики можуть знайти найширше застосування в аерокосмічній техніці, наприклад в якості сигнальних дротів, пристроїв захисту від розрядів статичної електрики, для створення різноманітних приводів і гнучких електричних схем. Так звані багатофункціональні полімерні матеріали можуть бути використані при виготовленні ракетних двигунів, динамічних в просторі конструкцій, а також при виробництві багатьох стандартних предметів армійського обладнання (наприклад, резервуарів, шин тощо)²³⁵.

В останні роки вдосконалені композити на полімерній основі або нанокомпозити є переважними структурними складовими для літальних апаратів завдяки своїй невеликій вазі та порівнянним механічним властивостям, але такі композиційні системи не забезпечують низького опору для потоку заряду і згодом вразливі до впливу удару блискавки і опадів²³⁶.

²³⁵ Gnitko V., Degtyariev K., Naumenko V., Strelnikova E. BEM and FEM analysis of the fluidstructure interaction in tanks with baffles, *Int. Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. 2017. Vol. 5 (3). P. 317–328. URL: <https://doi.org/10.2495/CMEM-V5-N3-317-328> [204]; Shugaylo O., Bilyk S. The Specifics of the Compilation of the Calculated Load Combinations in the Assessment of Seismic Resistance of Steel Supporting Structures of Nuclear Power Plant Equipment and Piping *J. of Mech. Eng.* 2022. Vol. 25 (3). P. 6-15. URL: <https://doi.org/10.15407/pmach2022.03.006> [205]; Серікова О. М., Стрельнікова О. О., Пісня Л. А., Крютченко Д. В. Дослідження впливу пікових амплітуд сейсмічного прискорення при землетрусі на техногенні об'єкти. Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: зб. наук. статей XVI Міжнародної науково-практичної конференції УКРНДІЕП (м. Харків, 14–18 вер. 2020 р.). 2020. С. 221–223 [206]; Серікова О. М., Стрельнікова О. О., Пісня Л. А., Крютченко Д. В. Вплив сейсмічних навантажень на резервуари для збереження отруйних та легкозаймистих рідин. Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: зб. наук. статей XVI Міжнародної науково-практичної конференції УКРНДІЕП (м. Харків, 14–18 вер. 2020 р.). 2020. С. 217–220 [207].

²³⁶ Yadav R., Tirumali M., Wang X., Naebe M., Kandasubramanian B. Polymer

Поява нанотехнологій у галузі полімерних композитів продемонструвала здатність обходити поширеність такого статичного накопичення заряду і одночасно забезпечує синергетичну особливість полімеру та нанокомпозиту²³⁷. Хоча полімери мають природні ізоляційні властивості, але різні нанонаповнювачі, такі як сажа, вуглецеве волокно, 1-н тетрадецил-3-метилімідазоліумбромід, металеві частинки та нановолокна, такі як поліанілін²³⁸, продемонстрували значне збільшення провідності що перевищує поріг ізоляції. Хоча детальна оцінка композиційних або нанокомпозитних матеріалів для аерокосмічних досліджень широко використовувалась²³⁹, але використання таких матеріалів для обходу явища статичного заряду в структурно-космічному застосуванні було найменш досліджено у формі огляду.

В роботі Baur та Silverman²⁴⁰ показано використання різних наночастинок та його дослідження для різних авіонічних застосувань. У контексті зменшення статичного заряду в авіонічному композиті вбудовані наповнювачі в полімері іноді називають антистатичними агентами і, в основному, класифікують на основі їх модельного складу та хімічної структури²⁴¹. Pionteck та Wyruch продемонстрували, що антистатичні агенти в режимі їх застосування можуть бути відчужені на внутрішні та зовнішні антистатичні агенти, де зовнішні нанесені фрагменти є поверхнево-активними іонними або неоніонними, тоді як внутрішньо активні агенти використовуються для розвитку провідних

composite for antistatic application in aerospace. *Defence Technology*. 2020. Vol. 16. Is. 1. P. 107–118. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.04.008> [208].

²³⁷ Pramanik S., Hazarika J., Kumar A., Karak N. Castor oil based hyperbranched poly (ester amide) polyaniline nanofiber nanocomposites as antistatic materials. *Ind Eng Chem Res*. 2013. Vol. 52 (16). P. 5700–5707 [209].

²³⁸ Yadav R., Tirumali M., Wang X., Naebe M., Kandasubramanian B. Polymer composite for antistatic application in aerospace. *Defence Technology*. 2020. Vol. 16. Is. 1. P. 107–118. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.04.008> [208].

²³⁹ Там само [208].

²⁴⁰ Baur J., Silverman E. Challenges and Opportunities in multifunctional nanocomposite structures for aerospace applications. *MRS Bull*. 2007. 32. P. 28–34 [210].

²⁴¹ Yadav R., Tirumali M., Wang X., Naebe M., Kandasubramanian B. Polymer composite for antistatic application in aerospace. *Defence Technology*. 2020. Vol. 16. Is. 1. P. 107–118. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.04.008> [208].

шляхів у полімерних матеріалах за допомогою армування²⁴².

Вуглецеві антистатичні агенти, такі як графен, вуглецеві нанотрубки (багатостінні вуглецеві нанотрубки та одностінні вуглецеві нанотрубки), вуглецеві нановолокна та оксид графена широко застосовуються для зменшення накопичення статичного заряду на полімерній поверхні²⁴³.

Інші автори²⁴⁴ продемонстрували, що відстань зазору між частинками відіграє суттєву роль у кінцевій об'ємній провідності зразка. Повідомляється, що збільшення концентрації наповнювача зменшує відстань між частинками заповнювача, що, в свою чергу, збільшує щільність зшивання, а це призводить до збільшення композитної провідності²⁴⁵.

Відоме використання як екрануючих матеріалів електропровідних покриттів на полімерах або інших діелектриках. Однак, вони можуть відшаровуватися або розтріскуватися при навантаженнях. Ця проблема може бути вирішена при використанні нанокомпозитів полімерів з електропровідними наповнювачами²⁴⁶. Разом з тим, у випадку мікронорозмірних наповнювачів (металеві та вуглецеві волокна і частки, сажа тощо) для досягнення достатньої електропровідності композиту потрібно використовувати високі наповнення до 16 об. %²⁴⁷. Як наслідок, при цьому погіршуються механічні характеристики матеріалу. Для розв'язання цієї проблеми запропоновано нанорозмірні електропровідні наповнювачі, наприклад

²⁴² Там само [208].

²⁴³ Горових О. Г., Оразбаєв А. Р. Механізм електризації вуглеводневої рідини при заповненні нею резервуарів вертикального типу. *Надзвичайні ситуації: освіта і наука*. 2014. Т. 9. № 2. С. 16–22 [211]; Горових О. Г., Оразбаєв А. Р. Визначення енергії розряду статичної електрики з падаючої краплею нафтопродукту. Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення боєздатності оперативно-рятувальних підрозділів: Зб. тез. матеріалів Всеукр. наук.-практ. конф. (Харків, 21 берез. 2013 р.). НУЦЗ України. 2013. С. 286–288 [212]; Huang J. C. Carbon black filled conducting polymers and polymer blends. *Adv Polym Technol: J Polym Proc Inst*. 2002. 21. P. 299–313 [213].

²⁴⁴ Yadav R., Tirumali M., Wang X., Naebe M, Kandasubramanian B. Polymer composite for antistatic application in aerospace. *Defence Technology*. 2020. Vol. 16. Is. 1. P. 107–118. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.04.008> [208].

²⁴⁵ Там само [208].

²⁴⁶ Ravati S., Favis B. D. Low percolation threshold conductive device derived from a fivecomponent polymer blend. *Polymer*. 2010. V. 51. P. 3669–3684 [214].

²⁴⁷ Там само [214].

вуглецеві нанотрубки, що забезпечують високу провідність і міцність матеріалу навіть при низькому вмісті вуглецевих нанотрубок²⁴⁸.

Важливим є створення нового гібридного нанокомпозиту, що ефективно екранує від електромагнітних полів у широкому частотному діапазоні 10 МГц - 20 ГГц, має високу електропровідність та є механічно міцним. Тому в роботі досліджено властивості композитів та нанокомпозитів із невпорядкованими та впорядкованими системами вуглецевих волокнистих включень, що можуть використовуватись для нейтралізації статичних електричних зарядів, які виникають в нафтосховищах та можуть призвести до виникнення надзвичайних ситуацій²⁴⁹.

5.3. Дослідження властивостей нанокомпозитів у якості матеріалу резервуарів зберігання рідких вуглеводнів

Проблема техногенного навантаження на навколишнє природне середовище від сховищ рідких вуглеводнів є актуальною проблемою екологічної безпеки та сталого розвитку промислових територій як на території України, так і за її межами. Вплив сейсмічних навантажень на резервуари для зберігання рідких вуглеводнів призводить до порушення стійкості резервуарів, їх герметичності, що в свою чергу призводить до забруднення атмосферного повітря, підземних і поверхневих вод і ґрунтів внаслідок аварійних розливів і пожеж на ємності для зберігання екологічно небезпечних речовин. Надзвичайні ситуації, що супроводжуються розливами рідких вуглеводнів, призводять до деградації екосистем, а отже, є фактором екологічного ризику. Тому розробка та впровадження екологічно безпечних та економічно ефективних способів зберігання рідких вуглеводнів є пріоритетним завданням зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище при сейсмічних навантаженнях різної інтенсивності та походження.

²⁴⁸ Гібридний електропровідний плівковий нанокомпозит для електромагнітного та електростатичного захисту: пат. 99185 Україна: Н05К 9/00, МПК (2015.01). № у 2014 12311, заяв. 17.11.2014; опубл. 25.05.2015, Бюл. № 10. 5 с. [215].

²⁴⁹ Там само [215].

Останніми роками на виробничих площах сховищ зосереджені значні маси вибухонебезпечних нафтопродуктів, значно зросла кількість аварій через їх невинуватене близьке розташування, що набуватиме дедалі більшої загрози. В даний час на нафтобазах експлуатується широкий спектр резервуарів і обладнання для їх обслуговування. Найбільш небезпечною складовою нафтобази є складське обладнання, розташоване в резервуарному парку. Для зберігання легкозаймистих і горючих рідин проектується і встановлюються окремо стоячі і групові резервуари. Металеві ємності для зберігання палива вже багато років використовуються на всіх нафтобазах. Це циліндричні горизонтальні, вертикальні, одностінні і двостінні баки, призначені для зберігання рідкого палива (бензину, дизельного палива, гасу). За багато років експлуатації вони зарекомендували себе як надійні та якісні вироби, зручні в транспортуванні, установці та обслуговуванні. Всі резервуари виготовлені згідно технічного завдання з листової сталі. Перед фарбуванням резервуари проходять піскоструминну обробку для покращення покриття ґрунту та фарби, що додатково захищає резервуар від корозії, тим самим подовжуючи термін його служби. Під час виробництва кожен резервуар перевіряється на міцність і герметичність пневматичним тиском. На додаток до обладнання, яке служить для функціонування резервуарів за призначенням, вони повинні бути оснащені відповідним аварійним обладнанням і повинні бути вжиті відповідні заходи. Основні небезпеки, притаманні експлуатації резервуарів, визначаються пожежо-вибуховими властивостями нафтопродуктів, їх кількістю та відстанню до інших небезпечних об'єктів²⁵⁰.

²⁵⁰ Дегтярьов К. Г. , Гнітько В. І., Стрельнікова О. О., Тонконоженко А. М. Розрахункові моделі для аналізу механічних властивостей тривимірних нанокомпозитів на основі методів скінчених та граничних елементів. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2018. № 2. С. 43–54 [216]; Karaiev A., Strelnikova E., Axisymmetric polyharmonic spline approximation in the dual reciprocity method. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*. 2021. Vol. 101. P. e201800339. URL: <https://doi.org/10.1002/zamm.201800339> [217]; Gnitko V., Degtyariov K., Karaiev A., Strelnikova E. Multi-domain boundary element method for axisymmetric problems in potential theory and linear isotropic elasticity. *WIT Transactions in Engineering Sciences*. WIT Press: Southampton and Boston. 2019. vol. 122. P. 13–25. URL: <https://doi.org/10.2495/BE410021> [218]; Srivastava

H. M. Integral Transformations, Operational Calculus and Their Applications. Symmetry. 2020. Vol. 12(7). 1169 p. URL: <https://doi.org/10.3390/sym12071169>;

Guo Y., Iyer S. Regularity and expansion for steady Prandtl equations, Comm. Math. Phys. 2021. 382(3). P. 1403–1447 [219]; Behshad A., Reza Shekari M., 2018. A Boundary Element Study for Evaluation of the Effects of the Rigid Baffles on Liquid Sloshing in Rigid Containers. *International journal of maritime technology*. 2018. Vol.10. P. 45–54. URL: <https://doi.org/10.29252/ijmt.10.45> [221]; Godoy L. A. Buckling of vertical oil storage steel tanks: Review of static buckling studies//Thin Walled Struct. 2016. Vol. 103. P. 1–21 [222]; Hamdan F.H. Seismic behaviour of cylindrical steel liquid storage tanks. J. Constr. Steel Res. 2000. Vol. 53. № 3. P. 307–333 [223]; Hanson R. Behaviour of liquid storage tanks. The great Alaska Earthquake of 1964. Washington D.C.: Committee on the Alaska Earthquake, Division of the Earth Sciences, National Research Council, National Academy of Sciences.1973. P. 331–339 [224]; Haroun M. A., Bhatia H. Analysis of tank damage during the 1994 Northridge Earthquake. Proceedings of the 4th US Conference on Lifeline Earthquake Engineering, ASCE. New York. 1995. P. 763–770 [225]; Hatayama K. Lessons from the 2003 Tokachi-oki, Japan, earthquake for prediction of long-period strong ground motions and sloshing damage to oil storage tanks. J. Seismol. 2008. Vol. 12. № 2. P. 255–263 [226]; Higuchi S., Mori T., Matsuda T., Goto Y., Akiyama H., Toki K., Kobayashi M. Seismic Performance of LNG Storage Tank Foundations During the Very Large Earthquake. 12th World Conferences on Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand, 2000. P. 1–8 [227]; Koketsu K., Miyake H. A seismological overview of long-period ground motion. J. Seismol. 2008. Vol. 12. № 2. P. 133–143 [228]; Manos G. C., Clough R. W. Tank damage during the may 1983 coalinga earthquake. Earthq. Eng. Struct. Dyn. 1985. Vol. 13, № 4. P. 449–466 [229]; Shimizu N. Advances and Trends in Seismic Design of Cylindrical Liquid Storage Tanks. JSME. 1990. Vol. 33, № 2. P. 111–124 [230]; Lukovsky. Numerical simulation of sloshing of a liquid in a moving closed rectangular container. *International Journal of Fluid Mechanics Research*. 1999. Vol. 26 [231]; Kubenko V. D., Koval'chuk P. S. Nonlinear problems of the dynamics of elastic shells partially filled with a liquid. *International Applied Mechanics*. 1999. Vol. 36. № 4. P. 421–448 [232]; Strelnikova E., Gnitko V., Krutchenko D., Naumenko Y. Free and forced vibrations of liquid storage tanks with baffles. *Journal of Modern Technology & Engineering*. 2018. Vol. 3. № 1. P. 15–52 [233]; Шульженко М. Г., Гонтаровський П. П., Гармаш Н. Г., Глядя А. О., Швецов В. Л., Гришин М. М., Губський О. М. Оцінка реакції потужного турбоагрегату на сейсмічне навантаження. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2016. № 2 (82). С. 85–93 [234]; Abramson, H. N., The Dynamic Behaviour of Liquids in Moving Containers. NASA SP- 106, Washington, D.C., 1966, updated by Dodge, F.T., Southwest Research Institute. 2000. P. 23-37 [235]; Langeveld J. M. The Design of Large Steel Storage Tanks for Crude Oil and Natural. Gas. *Proceedings of the Annual Meeting of the International Institute of Welding*. 1974. P. 35–95 [236]; Бредун В. І.,

Для порівняння рівня безпеки різних типів резервуарів для зберігання нафти і нафтопродуктів за кордоном розроблена спеціальна методика їх оцінки з урахуванням п'яти основних факторів:

- можливість вибуху;
- можливість виникнення пожежі внаслідок загоряння вентиляційної (дыхальної) пари;
- ймовірність пошкодження внаслідок дії факторів пожежі;
- можливість ефективного гасіння пожежі;
- залежність безпеки від використання механічного обладнання (наприклад, використання неіскробезпечного інструменту в місцях можливого утворення вибухонебезпечних сумішей).

Усі конструкції резервуарів порівнюються з «ідеальним» резервуаром, для якого кожен із п'яти факторів оцінюється в 20 балів (максимум), що визначає загальний ступінь безпеки 100 одиниць. «Ідеальний» резервуар умовно визначається як посудина під тиском, призначена для повного виключення вентиляції, розташована належним чином або будь-яким чином захищена від пожежі. Такий резервуар економічно і практично неприйнятний. Він може служити лише для порівняльної оцінки тієї чи іншої проблеми безпеки. Саме нагріті поверхні є основним джерелом загоряння і внутрішнього вибуху в резервуарах, розташованих поблизу вогнища пожежі. Руйнування таких резервуарів викликається підвищенням тиску пари всередині резервуарів у разі перевищення аварійної витрати пари над розрахунковою. Тому одним із головних правил запобігання аварії є охолодження резервуарів (особливо з низькокиплячими нафтопродуктами) водою. Розглянуто сучасні тенденції та напрямки розвитку вимог до забезпечення пожежовибухобезпеки резервуарів для всього комплексу проблем: підвищення стійкості та надійності металевих конструкцій; використання систем контролю за небезпекою; підвищення рівня пожежовибухобезпеки електротехнічних пристроїв; вибір високонадійного технологічного обладнання та пристроїв для

Харламова О. В., Шмандій В. М. Механізм формування екологічної небезпеки у регіоні під впливом техногенної сейсмічності. Екологічний інтелект. Зб. наук. праць за матеріалами V Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених. (Дніпро, 08-09 квітня 2010 р.) Дніпропетровськ : Дніпроп. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. С. 27–29 [237].

запобігання накопиченню відкладень; захист від корозії; використання відеокамер для оцінки стану резервуарів тощо²⁵¹.

²⁵¹ Бредун В. І., Харламова О. В., Шмандій В. М. Механізм формування екологічної небезпеки у регіоні під впливом техногенної сейсмічності. Екологічний інтелект. Зб. наук. праць за матеріалами V Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених. (Дніпро, 08-09 квітня 2010 р.) Дніпропетровськ : Дніпроп. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. С. 27–29 [237]; Шмандій В. М., Бредун В. І. Особливості формування екологічної небезпеки у регіонів під впливом техногенних землетрусів. Збалансований (сталий) розвиток України – пріоритет національної політики: матеріали Всеукраїнської екологічної конф. (Київ, 26 жовтня 2010 р.). Київ : Центр екологічної інформації, 2010. С. 322–326 [238]; Ha J. Gon, Park H. Joon, Lee M. Kyo, Lee H., Kim D.-S., Kwon S., Kim H. Seismic behavior of LNG storage tank considering soil-foundationstructure interaction with different foundation types. *Proc. of the 19th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (COEX, Seoul, Sep. 17 – 22, 2017) ed. by W. Lee, J.-S. Lee, H.-K. Kim, D.-S. Kim. Seoul. 2017. P. 931–934 [239]; Бойченко С. В., Пузік О. Г., Топільницький П. І., Черняк Л. М., Романчук В. В., Бабатунд О., Лейда К. Оцінка екологічного впливу нафтопереробного підприємства на навколишнє середовище. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2016. № 4. С. 109–122 [240]; Курганський В. М., Тішаєв І. В. До питання забруднення оточуючого середовища в процесі буріння нафтових та газових свердловин. *Вісник Київського національного університету ім. Т. Шевченка. Геологія*. 2006. Вип. 38–39. С. 7–9 [241]; Клімова Н. Деякі питання методики оцінки стану забруднення ґрунтів унаслідок нафтогазовидобування. *Вісник Львівського університету. Серія географічна*. 2006. Вип. 33. С. 144–151 [242]; Бабаджанова О. Ф., Гринчишин Н. М. Роль сорбентів при ліквідації аварійних виливів нафти і нафтопродуктів із поверхні ґрунту. Актуальні проблеми управління у сфері цивільного захисту: матеріали I Всеукраїнської науково-практичної конференції (Харків, 5 жовтня 2012 р.). Харків, 2012. С. 28–33 [243]; Азаров С. І., Сидоренко В. Л., Задунай О. С. Розроблення засад класифікації небезпечних критично важливих об'єктів із загрозою виникнення техногенних надзвичайних ситуацій. Науково-технічний журнал «Техногенноекологічна безпека». 2019. № 6(2). С. 3–11. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3558940> [244]; Побережний Л. Я., Яворський А. В., Цих В. С., Станецький А. І., Грицанчук А. В. Підвищення рівня екологічної безпеки трубопровідних мереж нафтогазового комплексу України. *Науково-технічний журнал «Техногенноекологічна безпека»*. 2017. № 1. С. 24–31 [245]; Лук'яненко Є. В., Янченко І. О., Аблеєва І. Ю. SWOT-аналіз технологій захисту гідросфери у нафтовидобувній галузі. Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування: матеріали IX Міжнародної наукової конференції молодих вчених (Харків, 25–26 листопада 2021 р.). Харків : ХНУ ім. В.Н. Каразіна. 2021. С. 169–171 [246]; Tadros A. F. F.

Environmental aspects of petroleum storage in above ground tank. *E3S Web of Conferences The International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2020)*. 2020. Vol. 166. 01006. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016601006> ICSF 2020 [247]; Siddiq M. A. Deformation and failure in nanomaterials via a data driven modelling approach. *Theoretical & Applied Mechanics Letters*. 2020. Vol. 10(4). P. 249-252. URL: <https://doi.org/10.1016/j.taml.2020.01.029> [248]; Shi L., Shuai J., Xu K. Fuzzy fault tree assessment based on improved AHP for fire and explosion accidents for steel oil storage tanks. *Journal of hazardous materials*. 2014. Vol. 278. P. 529–538. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.06.034> [249]; Sesetyan, K., Stucchi, M., Castelli, V., Gomez Capera, A. A. Kahramanmaras Gaziantep Türkiye M7.7 Earthquake, 6 February 2023 (04:17 GMT+03:00). Large historical earthquakes of the earthquake-affected region: a preliminary report. INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Italy. 2023. URL: <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/en/> [250]; Адаменко О. М., Адаменко Я. О., Яцишин Т. М. та ін. Екологічна безпека нафтогазового комплексу у західному регіоні. Колективна монографія за ред. проф. Я. О. Адаменка. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2017 [251]; Артемчук В. О., Попов О. О., Яцишин А. В., Кириленко Ю. О., Яцишин Т. М. Перспективи розробки математичних та програмних засобів перевірки екологічної ефективності прийняття управлінських рішень. *Моделювання та інформаційні технології: зб. наук. пр. Ін-ту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України*. 2018. Вип. 85. С. 75–80 [252]; Бакулін Є. М., Яворський М. М., Світлицький В. М. та ін. Концепція системи управління охороною навколишнього середовища на об'єктах ДК 354 «Укргазвидобування» відповідно до вимог стандартів ISO 14000. Нафтогазова енергетика. *Всеукраїнський науково-технічний журнал*. 2007. № 1(2). С. 5–11 [253]; Венгерцев Ю. О. Концепція дослідження технічного стану сталевих резервуарів. *Нафтова і газова промисловість*. 2005. № 5. С. 53–55 [254]; Венгерцев Ю. О., Бугай В. Ю. Прогнозування технічного стану і залишкового ресурсу експлуатації резервуарів. *Нафтова і газова промисловість*. 2005. № 6. С. 60–62 [255]; Витвицький Я. С., Кернична А. Є. Механізм державного управління в екологічній сфері на регіональному рівні та напрямки його вдосконалення. *Актуальні проблеми державного управління*. 2012. № 2 (42). С. 178–186 [256]; Козуля Т. В., Емельянова Д. І. Екологічний ризик на різних рівнях дослідження природно-техногенних систем, інформаційне забезпечення його оцінки. *Проблеми інформаційних технологій*. 2015. № 17. С. 138–144 [257]; Матвійчук Н. М., Сидорук С. В. Формування системи індикаторів екологічної безпеки України. *Сталий розвиток економіки*. 2018. № 38. С. 113–119 [258]; Степанюк Г. С. Особливості функціонування та проблеми управління техногенно небезпечними нафтогазовими підприємствами. *Науково-інформаційний вісник. Економіка*. 2015. № 11. С. 259–266 [259]; Адаменко Я. О., Архипова Л. М.

В умовах постійного розвитку будівельного ринку в Україні зростають вимоги до будівельних конструкцій і будівель. Резервуари для зберігання вуглеводнів представляють особливий інтерес для наукової спільноти та широкої громадськості. Слід зазначити, що при зберіганні вуглеводневої сировини виникають певні труднощі через властивості таких речовин. Вони вважаються пожежо-вибухонебезпечними, високочутливими, немає можливості змінити характеристики вуглеводневої сировини. Важливим чинником у виборі основних критеріїв створення оптимальних умов зберігання нафти є проектування резервуарів відповідно до сучасних стандартів і вимог. Велике значення для розгляду конструктивних особливостей резервуарів має тип розміщення і конструктивні особливості резервуарів. Важливим фактором є фізико-хімічні характеристики матеріалу бака.

Для забезпечення екологічної безпеки територій, прилеглих до резервуарів, заповнених нафтопродуктами, легкозаймистими чи отруйними речовинами, необхідно враховувати безпечну конструкцію резервуарів, матеріал резервуарів, а також прогнозувати вплив природних і техногенних факторів на резервуари. Комплекс природних факторів, які необхідно враховувати, це сейсмічні навантаження, рівень ґрунтових вод в районі розташування резервуарів та ін. Серед техногенних факторів слід враховувати раптові аварії на транспорті, промислові аварії, вібраційні та сейсмічні та штучні впливи тощо.

Екологічна оцінка гідроекосистем Битківського нафтопромислу. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2010. № 4. С. 136–143 [260]; Адаменко Я. О. Оцінка впливів техногенно небезпечних об'єктів на навколишнє середовище. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2010. № 2. С. 58–63 [261]; Клюк Б. О., Семчук Я. М. Моделювання забруднення довкілля методом збурень при відмові магістральних нафтопроводів. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2003. № 1(5). С. 94–95 [262]; Кривенко Г. М., Семчук Я. М., Возняк М. П., Возняк Л. В. Вплив чинників на технічний ризик у ході експлуатації нафтопроводів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2008. № 4. С. 108–111 [263]; Демченко П. М., Рудько Г. І. Основні екологічні проблеми нафтогазового комплексу України. Матеріали науково-практичної конференції «Екологічні проблеми нафтогазового комплексу». 2003. Т. 23. С. 27 [264]; Побережний Л. Я. Вплив аварій нафтогазопроводів на довкілля. *Екологія и промышленность*. 2007. № 3 (12). С. 20–24 [265].

Актуальними проблемами лінійної теорії пружності є дослідження пружних і механічних властивостей сучасних технологічно інноваційних нанокомпозитних матеріалів. Достовірність результатів чисельного моделювання таких матеріалів потребує відповідних математичних моделей, які адекватно описують структури нанорозмірних включень. Якщо аналіз був зосереджений на взаємодії атомів у наноматеріалах, то відповідні моделі мають базуватися на принципах квантової механіки. Але якщо дослідження було спрямоване на моделювання середніх механічних властивостей, середніх деформацій або ефективних модулів пружності, то підходи механіки безперервної середовища можуть бути успішно застосовані для забезпечення ефективних оцінок. Більшість результатів у цій галузі стосуються двовимірних конфігурацій. Що стосується тривимірних конфігурацій, то слід зазначити, що вони аналізувалися переважно з припущеннями про наявність у нанокомпозиті сферичних частинок. Для цих форм нанонеоднорідностей було доведено, що властивості міжфазних поверхонь можуть суттєво впливати як на пружні поля, так і на ефективні модулі композитних матеріалів. Одним із основних напрямів сучасної механіки нанорозмірних матеріалів є так званий багаторівневий підхід, метою якого є розширення сфери застосування класичної механіки суцільного середовища шляхом поєднання її основних теоретичних положень з ефектами, що спостерігаються на молекулярному рівні. Багато уваги приділено проблемі розрахунку ефективних властивостей матеріалів за наявності проміжного шару між контактуючими фазами. Залишаються актуальними проблеми визначення ефективних модулів композитів і нанокомпозитів з урахуванням впливу поверхневих ефектів і наявності систем упорядкованих і хаотично розташованих включень у представницьких комірках²⁵².

²⁵² Дригулич П. Г. Еколого-геологічний моніторинг забруднення довкілля об'єктами нафтогазового комплексу : автореф. дис. ... канд. геол. наук: спец. 21.06.01 "Екологічна безпека" ІваноФранків. нац. техн. ун-т нафти і газу. Івано-Франківськ, 2008. 19 с. [266]; Цайтлер М. Й. Заростання ділянок забруднених нафтопродуктами (на прикладі Бориславського нафтового родовища). *Дослідження, охорона та збагачення біорозмаїття*. Львів : УкрДЛТУ. 1999. С. 151–154 [267]; Бабаджанова О. Ф., Гринчишин Н. М., Сукач Ю. Г. Міграція нафти і нафтопродуктів у поверхневій шарі ґрунту при аварійних розливах. *Безпека життя і діяльності людини – освіта, наука, практика: зб. 129 наук. праць X*

В останні роки проблеми техногенно-екологічної безпеки поступово загострюються у зв'язку з економічним зростанням і розробкою нових технологічних процесів і матеріалів. Широке впровадження наноматеріалів, особливо нанокомпозитів, дозволяє підвищити безпеку без серйозного подорожчання. Чимало досліджень стосується застосування нанокомпозитів як матеріалів для резервуарів для нафтопродуктів, як покриттів, а деякі дослідження виявляють їх властивості електростатичного захисту. Актуальним є подальше дослідження властивостей матеріалів, що дозволяють забезпечити стабільну роботу техногенних об'єктів в умовах природних і техногенних впливів. Підвищення експлуатаційної надійності та забезпечення міцності резервуарів для зберігання рідких вуглеводнів при імпульсних, ударних і сейсмічних навантаженнях є критично важливим і є одним із найважливіших питань наукових досліджень у

міжнар. наук.-метод. конф. Київ : Національний авіаційний університет. 2011. С. 22–26 [268]; Величко О., Терек О. Вплив нафтового забруднення ґрунту на вміст аскорбінової кислоти та активність аскорбатоксидази в органах рослин люцерни округлої. *Наук. вісн. ЛНАВМ ім. С. З. Гжицького*. 2008. Т. 10, № 3. Ч. 2. С. 144–148 [269]; Величко О. І. Вміст нітратного азоту в ґрунті та органах рослин сої за умов забруднення ґрунту нафтою. *Науковий вісник НЛТУ України: збірник науково-технічних праць*. Львів : РВВ НЛТУ України. 2011. Вип. 21.16. С. 351–354 [270]; Джура Н. М., Цвілинюк О. М., Терек О. І. Вплив нафтового забруднення на вміст макро- та мікроелементів у рослинах *Carex hirta* L. *Укр. ботан. журн.* 2007. Т. 64, # 1. № С. 122–131 [271]; Панасенко Є. В. Вплив вуглеводнів нафти на зміну деяких водних показників чорноземного ґрунту. *Вісник ХНАУ. Ґрунтознавство*. 2008. № 2. С. 132–135 [272]; Стецишин В., Градович М., Подан І., Гальчук Р., Джура Н., Шевчик Л., Романюк О. Вплив нафтового забруднення ґрунту на ріст рослин *Helianthus annuus* L., *Fagopyrum esculentum* Moench. і *Linum usitatissimum* L. Молодь і поступ біології: збірник тез XII міжнар. наук. конф. студентів і аспірантів (м. Львів, 19-21 квітня 2016 р.). Львів, 2016. С. 176–177 [273]; Терек О. І., Величко О. І., Джура Н. М. Фізіологічні аспекти адаптації рослин до нафтозабрудненого ґрунту. *Фізіологія рослин: проблеми та перспективи розвитку: зб. наук. пр.* Київ : Логос. 2009. Т. 1. С. 217–225 [274]; Шевчик Л. З., Жак Т. В., Романюк О. І., Джура Н. М., Подан І. І., Гальчук Р. І. Дослідження латеральної міграції нафтової плями за участю тестових рослин. *Фундаментальні та прикладні дослідження в біології та екології*. Матер. IV міжнар. наук. конф. (м. Вінниця, 12-14 квітня, 2016 р.). Вінниця : ДРУК. 2016. С. 146–147 [275]; Петренко О. В., Скрипник В. І. Вплив сейсмічних навантажень на резервуари зберігання рідких вуглеводнів. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*. 2022. № 12 (1242). С. 114–121 [276].

різних напрямках²⁵³. Заповнені рідиною резервуари, виготовлені з різних нанокompозитних матеріалів, розглядалися з використанням концепції репрезентативного об'ємного елемента для опису їх матеріалу. Тому актуальним є удосконалення існуючих методів оцінки ефективного модуля композиційних матеріалів з нановключеннями різної форми, які дають змогу аналізувати статичні та динамічні характеристики резервуарів вуглеводнів із матеріалів із покращеними механічними властивостями.

Тверді нанокompозити та метаматеріали завдяки своїм унікальним механічним та фононним властивостям належать до сучасних технологічних та інноваційних матеріалів, які широко використовуються на практиці як відповідальні внутрішні та покривні елементи відповідальних інженерних конструкцій та систем²⁵⁴. Найважливішим тут є їх внесок у значне зміцнення при збереженні легкості та деформованості об'єктів.

Комп'ютерне моделювання та комп'ютерні експерименти є одними з потужних засобів такого дослідження завдяки їх можливості уніфікованої параметризації поведінки нанокompозитів і метаматеріалів у широкому діапазоні їхніх матеріальних, геометричних і поверхневих характеристик. З іншого боку, чисельне моделювання може в багатьох випадках значно оптимізувати фізичні експерименти на основі прогностичної інформації з числового аналізу зі зменшенням обсягу, вартості та часу експериментальних досліджень²⁵⁵.

Досліджено вплив сейсмічних навантажень на резервуари для зберігання рідких вуглеводнів²⁵⁶, а також використання

²⁵³ Кулик А. В., Ткаченко С. М. Підвищення сейсмостійкості резервуарів для зберігання нафти та продуктів її переробки. *Науковий вісник НТУУ "КПІ"*. 2023. № 2 (108). С. 102–108 [277]; Зайцев Д. О., Скрипник О. Г. Розробка методів розрахунку сейсмостійкості резервуарів зрідженого природного газу. *Проблеми машинобудування*. 2023. № 2. С. 52–58 [278].

²⁵⁴ Yershov S., Rusanov A., Gardzilewicz A., Lampart P. Calculations of 3D viscous compressible turbomachinery flows. In: *Proc. 2nd Symp. on Comp. Technologies for Fluid/Thermal/Chemical Systems with Industrial Applications. ASME PVP Division Conf.* (Boston, 1-5 August 1999). PVP. 1999. Vol. 397(2). P. 143-154 [38].

²⁵⁵ Zheng Jh., Xue M. A., Dou P., et al. A review on liquid sloshing hydrodynamics. *J Hydrodyn.* 2021. Vol. 33. P. 1089–1104. URL: <https://doi.org/10.1007/s42241-022-0111-7> [177].

²⁵⁶ Gnitko V., Degtyariov K., Karaiev A., Strelnikova E. Multi-domain boundary

нанокомпозитних матеріалів, запропоновано покращити міцнісні характеристики резервуарів.

У роботах багатьох дослідників²⁵⁷ проведено дослідження міцносних характеристик резервуарів для нафтопродуктів з

element method for axisymmetric problems in potential theory and linear isotropic elasticity. *WIT Transactions in Engineering Sciences. WIT Press: Southampton and Boston*. 2019. vol. 122. P. 13–25. URL: <https://doi.org/10.2495/BE410021> [218].

²⁵⁷ Gnitko V., Degtyariov K., Karaiev A., Strelnikova E. Multi-domain boundary element method for axisymmetric problems in potential theory and linear isotropic elasticity. *WIT Transactions in Engineering Sciences. WIT Press: Southampton and Boston*. 2019. vol. 122. P. 13–25. URL: <https://doi.org/10.2495/BE410021> [218]; Srivastava H. M. Integral Transformations, Operational Calculus and Their Applications. *Symmetry*. 2020. Vol. 12(7). 1169 p. URL: <https://doi.org/10.3390/sym12071169>; Guo Y., Iyer S. Regularity and expansion for steady Prandtl equations, *Comm. Math. Phys.* 2021. 382(3). P. 1403–1447 [219]; Шмандій В. М., Бредун В. І. Особливості формування екологічної небезпеки у регіонів під впливом техногенних землетрусів. Збалансований (сталий) розвиток України – пріоритет національної політики: матеріали Всеукраїнської екологічної конф. (Київ, 26 жовтня 2010 р.). Київ : Центр екологічної інформації, 2010. С. 322–326 [238]; Ha J. Gon, Park H. Joon, Lee M. Kyo, Lee H., Kim D.-S., Kwon S., Kim H. Seismic behavior of LNG storage tank considering soil-foundationstructure interaction with different foundation types. *Proc. of the 19th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (COEX, Seoul, Sep. 17 – 22, 2017) ed. by W. Lee, J.-S. Lee, H.-K. Kim, D.-S. Kim. Seoul. 2017. P. 931–934 [239]; Бойченко С. В., Пузік О. Г., Топільницький П. І., Черняк Л. М., Романчук В. В., Бабатунд О., Лейда К. Оцінка екологічного впливу нафтопереробного підприємства на навколишнє середовище. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2016. № 4. С. 109–122 [240]; Курганський В. М., Тішаєв І. В. До питання забруднення оточуючого середовища в процесі буріння нафтових та газових свердловин. *Вісник Київського національного університету ім. Т. Шевченка. Геологія*. 2006. Вип. 38–39. С. 7–9 [241]; Siddiq M. A. Deformation and failure in nanomaterials via a data driven modelling approach. *Theoretical & Applied Mechanics Letters*. 2020. Vol. 10(4). P. 249–252. URL: <https://doi.org/10.1016/j.taml.2020.01.029> [248]; Shi L., Shuai J., Xu K. Fuzzy fault tree assessment based on improved AHP for fire and explosion accidents for steel oil storage tanks. *Journal of hazardous materials*. 2014. Vol. 278. P. 529–538. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.06.034> [249]; Sesetyan, K., Stucchi, M., Castelli, V., Gomez Capera, A. A. Kahramanmaras Gaziantep Türkiye M7.7 Earthquake, 6 February 2023 (04:17 GMT+03:00). Large historical earthquakes of the earthquake-affected region: a preliminary report. INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Italy. 2023. URL: <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/en/> [250]; Адаменко О. М., Адаменко Я.

нанокомпозитами як матеріал резервуарів. Встановлено, що використання композиційних матеріалів з нановключеннями в резервуарах для зберігання рідких вуглеводнів дозволяє підвищити надійність резервуару при сейсмічних навантаженнях і подовжити термін його служби під впливом природних і техногенних факторів різного походження. Властивості електростатичного захисту нанокомпозитних матеріалів описані в роботах О. М. Серікової²⁵⁸.

Необхідність контролю та оцінки впливу наноматеріалів на навколишнє середовище для безпечного та ефективного використання нанотехнологій обґрунтовано в роботах Vambol S., Vambol V., Suchikova Y., Deyneko N²⁵⁹.

Багато наукових праць присвячено вивченню репрезентативних об'ємних елементів з поодинокими вкрапленнями у формі сфер і округлих циліндрів²⁶⁰. Однак неканонічні включення вивчені недостатньо, незважаючи на їх очевидне широке поширення.

О., Яцишин Т. М. та ін. Екологічна безпека нафтогазового комплексу у західному регіоні. Колективна монографія за ред. проф. Я. О. Адаменка. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2017 [251]; Демченко П. М., Рудько Г. І. Основні екологічні проблеми нафтогазового комплексу України. Матеріали науково-практичної конференції «Екологічні проблеми нафтогазового комплексу». 2003. Т. 23. С. 27 [264]; Побережний Л. Я. Вплив аварій нафтогазопроводів на довкілля. *Екологія и промышленность*. 2007. № 3 (12). С. 20–24 [265]; Дригулич П. Г. Еколого-геологічний моніторинг забруднення довкілля об'єктами нафтогазового комплексу : автореф. дис. ... канд. геол. наук: спец. 21.06.01 "Екологічна безпека" ІваноФранків. нац. техн. ун-т нафти і газу. Івано-Франківськ, 2008. 19 с. [266]; Цайтлер М. Й. Заростання ділянок забруднених нафтопродуктами (на прикладі Бориславського нафтового родовища). *Дослідження, охорона та збагачення біорозмаїття*. Львів : УкрДЛТУ. 1999. С. 151–154 [267] та ін.

²⁵⁸ Sierikova O., Koloskov V., Degtyarev K., Strelnikova E. Improving the Mechanical Properties of Liquid Hydrocarbon Storage Tank Materials. *Materials Science Forum*. 2022. Vol. 1068. P. 223–229. DOI: 10.4028/p-888232 [202].

²⁵⁹ Vambol S., Vambol V., Suchikova Y., Deyneko N. Analysis of the ways to provide ecological safety for the products of nanotechnologies throughout their life cycle. *EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 1/10(85) (2017) P. 27-36. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.85847> [131].

²⁶⁰ Sierikova O., Strelnikova E., Degtyarev K. Strength Characteristics of Liquid Storage Tanks with Nanocomposites as Reservoir Materials. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2022. P. 151-157. URL: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916369> [128]; Vambol S., Vambol V., Suchikova Y., Deyneko N. Analysis of the ways to provide ecological safety for the

Розроблено універсальний метод виробництва наноматеріалів на основі застосування твердофазної матриці з упорядкованою пористістю. Метод дозволяє створювати наноматеріали з унікальним набором функціональних властивостей, характерних тільки для високоорганізованих масивів упорядкованих наночастинок з вузьким розподілом пор за розмірами.

У роботі обґрунтовано доцільність впровадження нановолокон у композиційні матеріали, їх розташування та форму для подальшого використання як матеріалів у системах зберігання рідких вуглеводнів.

5.4. Дослідження залежності міцносних характеристик нанокомпозитних матеріалів від способу розміщення вуглецевих нанонаповнювачів та заповнення матриці включеннями

Розроблені в²⁶¹ математичні та розрахункові моделі на основі МСЕ дозволяють проводити аналіз наноматеріалів із сферичними суцільними або порожнистими включеннями, а також з короткими нановолокнами та нанотрубками.

Досліджено серію наноккомпозитних матеріалів на основі епоксидної матриці з вуглецевими наповнювачами різного засобу розміщення. За допомогою програмного комплексу знайдено і досліджено залежність міцнісних характеристик наноккомпозитного

products of nanotechnologies throughout their life cycle. *EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 1/10(85) (2017) P. 27-36. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.85847> [171]; Kovalov A., Otrosh Y., Rybka E., Kovalevska T., Togobytska V., Rolin I. Treatment of Determination Method for Strength Characteristics of Reinforcing Steel by Using Thread Cutting Method after Temperature Influence. In *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd. 2020. Vol. 1006. P. 179–184 [198]; Surianinov M., Andronov V., Otrosh Y., Makovkina T., Vasiukov S. Concrete and fiber concrete impact strength. *Materials Science Forum*. 2020. 1006 MSF. P. 101–106 [199]; Sierikova O., Koloskov V., Degtyarev K., Strelnikova E. Improving the Mechanical Properties of Liquid Hydrocarbon Storage Tank Materials. *Materials Science Forum*. 2022. Vol. 1068. P. 223–229. DOI: 10.4028/p-888232 [202].

²⁶¹ Sierikova O., Koloskov V., Degtyarev K., Strelnikova E. Improving the Mechanical Properties of Liquid Hydrocarbon Storage Tank Materials. *Materials Science Forum*. 2022. Vol. 1068. P. 223–229. DOI: 10.4028/p-888232 [202].

матеріалу від способу розміщення вуглецевих нанонаповнювачів, а також рівня заповнення матриці включеннями.

Вважалось, що матриця нанокомпозиту зі затверділої епоксидної смоли має такі анізотропні властивості: густина $\rho_m = 1160 \text{ кг/м}^3$, модуль пружності $E_m = 3,78 \text{ ГПа}$, коефіцієнт Пуассона $\nu_m = 0,35$.

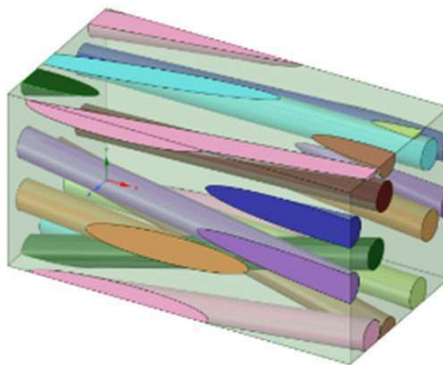
Як матеріал включення, розглянуті вуглецеві наповнювачі з ортотропними властивостями: густина 1800 кг/м^3 , модуль пружності в напрямку ОХ, $E_1 = 290 \text{ ГПа}$, модуль пружності в напрямку ОУ, $E_2 = 23 \text{ ГПа}$, модуль пружності в напрямку ОZ, $E_3 = 23 \text{ ГПа}$, коефіцієнт Пуассона ХУ, $\nu_{12} = 0,2$, коефіцієнт Пуассона YZ, $\nu_{23} = 0,4$, коефіцієнт Пуассона ХZ, $\nu_{13} = 0,2$, модуль зсуву ХУ, $G_1 = 9 \text{ ГПа}$, модуль зсуву YZ, $G_2 = 214 \text{ ГПа}$, модуль зсуву ХZ, $G_3 = 9 \text{ ГПа}$.

В результаті проведених розрахункових досліджень з використанням методу, розробленого в²⁶² з'ясовані механічні характеристики нових нанокомпозитних матеріалів.

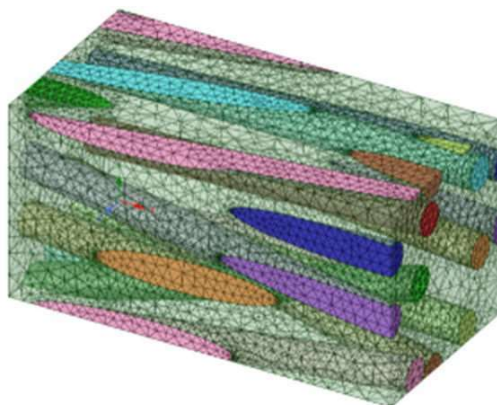
Невпорядковані волокнисті включення

Аналогічно дослідженню матриць з циліндричними включеннями, виконаний аналіз нанокомпозитів з наповнювачем у вигляді частково впорядкованих повздовжніх вуглецевих волокон. Вуглецеві нановолокна розташовані вздовж всієї довжини матриці, мають діаметр 1 нм , й максимально допустиме відхилення від головної осі складає 10 градусів. Проаналізовано об'ємну частку включень від $0,025$ до $0,25$. Розрахункові моделі нанокомпозиту з об'ємною часткою включень, що дорівнює $0,2$, подані на рисунку 5.2.

а)



²⁶² Gnitko V., Degtyariov K., Karaiev A., Strelnikova E., Multi-domain boundary element method for axisymmetric problems in potential theory and linear isotropic elasticity, *WIT Transactions on Engineering Sciences*. WIT Press. 2019. P. 13–25. URL: <https://doi.org/10.2495/BE410021> [218]; Karaiev A., Strelnikova E., Axisymmetric polyharmonic spline approximation in the dual reciprocity method. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*. 2021. Vol. 101. P.e201800339. URL: <https://doi.org/10.1002/zamm.201800339> [217].



б)

Рисунок 5.2 – Представницька комірка (а) і скінченно-елементна (б) модель наноматеріалу з волокнистими частково впорядкованими включеннями

Результати розрахунків подані в таблиці 5.2, вивчались волокнисті вуглецеві включення однакового розміру й ортотропними властивостями матеріалу.

Таблиця 5.2

Механічні властивості нанокompозиту з волокнистими включеннями

Об'ємна частка	0.0259	0.0504	0.0764	0.1002	0.1261	0.1510	0.1791	0.2039	0.2294	0.2525
E_1 , МПа	7815,8	14788	22541	30985	35518	39187	40591	40471	50946	58330
E_2 , МПа	4205,3	4419,4	4621	4780,1	4934,2	5106,1	5378,5	5568,8	5753,8	6301,5
E_3 , МПа	4090,2	4397,9	4589	4791,8	5027,8	5160,1	5398,8	5511,3	5723,5	6012,1

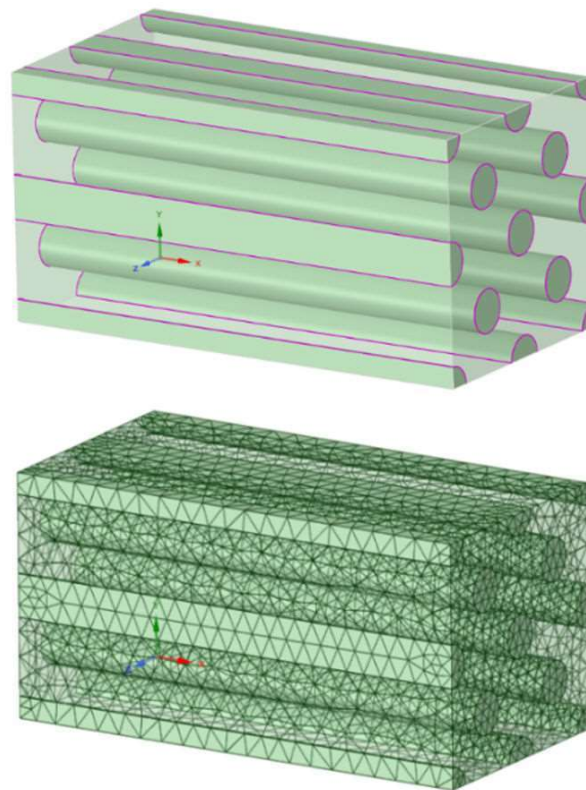
Густина	V_{23}	V_{13}	V_{12}	G_{31}, MPa	G_{23}, MPa	G_{12}, MPa
1176	0,4333	0,4032	0,3220	1686,4	1447,2	1483,7
1192	0,4775	0,3623	0,3382	1576,8	1490,8	1524,9
1211	0,4885	0,3451	0,3242	1601	1544	1675
1224	0,4979	0,3377	0,3384	1654,8	1584,5	1636,7
1240	0,4876	0,3218	0,3900	1794,2	1629,8	1870,3
1256	0,4909	0,3333	0,3596	1838,1	1689,3	1815,5
1274	0,4783	0,4448	0,3160	2246,9	1761,7	1915
1290	0,4785	0,5065	0,2549	2477,5	1814,7	1959
1306	0,4779	0,4638	0,3242	2340,9	1885,8	2200,6
1321	0,4785	0,3199	0,3707	2113,5	1911,8	2385,2

З'ясовано, що застосування включень у вигляді вуглецевих нановолокон демонструє зростання міцнісних характеристик матеріалу в напрямку волокон. За однакову об'ємну частку включень, зміцнення матеріалу волокнами виявилось більш ніж в 10 разів ефективнішим в порівнянні зі зміцненням циліндричними або сферичними

включеннями з того ж матеріалу. Крім значного зміцнення, яке характеризується модулем E_1 , відбулося також зміцнення і в інших напрямках, близьке за рівнем у порівнянні з іншими видами включень.

Впорядковані волокнисті включення

Досліджені матриці з наповнювачем у вигляді повздовжніх та впорядкованих за схемою діаманта вуглецевих волокон. Вуглецеві нановолокна розташовані вздовж всієї довжини матриці, мають діаметр 1 нм, напрямок волокон співпадає з напрямком однієї з осей координат. Проаналізовано об'ємну долю включень від 0,025 до 0,25. Розрахункові моделі нанокомпозиту з об'ємною часткою включень, рівної 0.2, подані на рисунку 5.3²⁶³.



а)

б)

Рисунок 5.3 – Представницька комірка (а) і скінченно-елементна (б) модель наноматеріалу з впорядкованими волокнистими включеннями

²⁶³ Дегтярьов К. Г. , Гнітько В. І., Стрельнікова О. О., Тонконоженко А. М. Розрахункові моделі для аналізу механічних властивостей тривимірних нанокомпозитів на основі методів скінчених та граничних елементів. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2018. № 2. С. 43–54 [216].

Результати дослідження надані в таблиці 5.3, розрахунки проведено для волокнистих вуглецевих включень однакового розміру, з ортотропними властивостями матеріалу.

Таблиця 5.3

Механічні властивості нанокompозиту з волокнистими включеннями

Об'ємна частка	E_1 , МПа	E_2 , МПа	E_3 , МПа	G_{12} , МПа	G_{23} , МПа	G_{31} , МПа
0,025	10935	4228,8	4228,8	1452,3	1444,9	1452,3
0,05	18095	4429,3	4429,3	1506,5	1492,8	1506,5
0,075	25252	4589,9	4589,9	1562,8	1544,4	1562,8
0,1	32404	4739,1	4739,1	1621,4	1600,6	1621,4
0,125	39561	4883,3	4883,3	1682,3	1660,5	1682,3
0,15	46719	5026,3	5026,3	1745,6	1724,6	1745,6
0,175	53875	5169,8	5169,8	1811,5	1793	1811,5
0,2	61033	5316,2	5316,2	1880,3	1866,6	1880,3
0,225	68190	5466,5	5466,5	1952,2	1945,9	1952,2
0,25	75347	5621,4	5621,4	2027,5	2030,7	2027,5

Густина	V ₂₃	V ₁₃	V ₁₂
1,176	0,4649	0,3454	0,3454
1,192	0,490	0,341	0,341
1,208	0,5004	0,3365	0,3365
1,224	0,5057	0,3321	0,3328
1,24	0,5089	0,3278	0,3278
1,256	0,5110	0,3235	0,3255
1,272	0,512	0,3193	0,3193
1,288	0,513	0,3150	0,3151
1,304	0,5146	0,3109	0,3109
1,32	0,515	0,3068	0,3068

Як і в попередньому випадку, застосування наповнювача у вигляді вуглецевих волокон демонструє зростання міцнісних характеристик матеріалу в напрямку волокон. У порівнянні з частково впорядкованими волокнами, повне структуроване впорядкування ще більше підвищило міцнісні властивості в головному напрямку розташування волокон, різниця склала більше 29 %, однак знизило міцнісні характеристики в двох інших напрямках на 6-12 %. Таким чином, застосування вуглецевих нановолокон дозволяє створити якісний нанокомпозит, що має виражені ортотропні властивості.

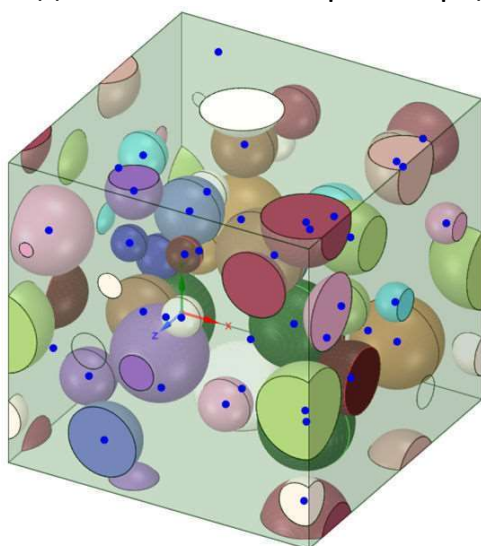
Встановлено, що застосування наповнювача у вигляді вуглецевих волокон демонструє зростання міцнісних характеристик матеріалу в напрямку волокон. Повне структуроване впорядкування нановолокон ще більше підвищує міцнісні властивості в головному напрямку розташування волокон, однак несуттєво знижує міцнісні характеристики в двох інших напрямках. Результати досліджень доводять, що застосування вуглецевих нановолокон для створення якісного нанокомпозиту є доцільним, і його можливо використовувати

для нейтралізації статичних електричних зарядів, які виникають в РЗРВ та можуть призвести до виникнення надзвичайних ситуацій²⁶⁴.

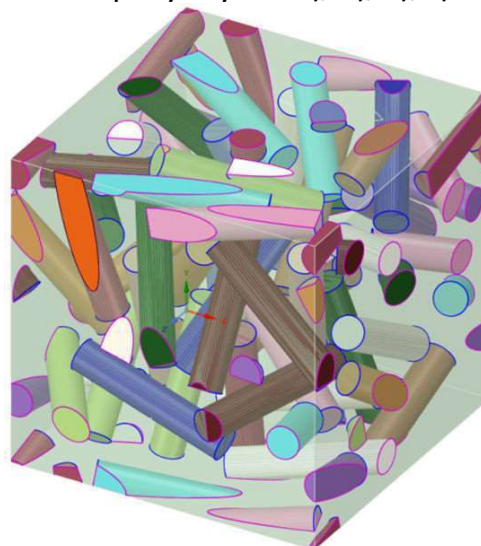
5.5. Метод покращення механічних властивостей матеріалів резервуарів для зберігання рідких вуглеводнів

На прикладі розглянуто моделі резервуарів для вуглеводнів, виготовлених з композиційних матеріалів. Наведено дані про властивості матеріалів матриці та включень. Опрацьовано нанокомпозити з алюмінієвою матрицею зі сталевими сферичними включеннями та зі сталевими та вуглецевими включеннями-волоконнами.

Репрезентативні об'ємні елементи (репрезентативні комірки) для дослідження таких матеріалів представлені на рисунку 5.4 а), б), в), г).

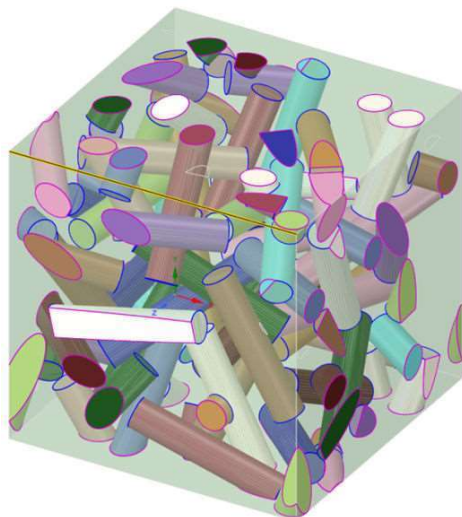


(а) представницька комірка для алюмінієвої матриці зі сталевими включеннями у вигляді наносфер (кульок)

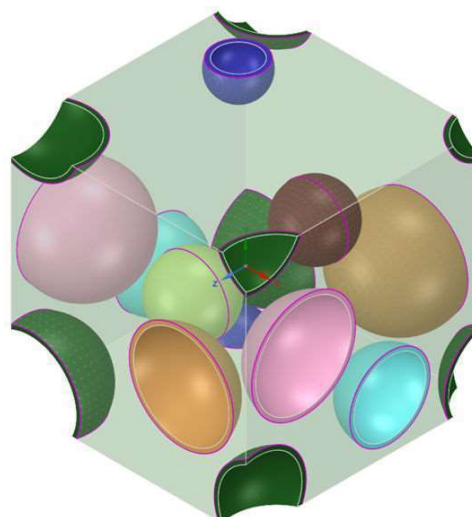


(б) представницька комірка для алюмінієвої матриці з включеннями у формі сталевих включень-волокон

²⁶⁴ Дегтярьов К. Г. , Гнітько В. І., Стрельнікова О. О., Тонконоженко А. М. Розрахункові моделі для аналізу механічних властивостей тривимірних нанокомпозитів на основі методів скінчених та граничних елементів. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2018. № 2. С. 43–54 [216].



(в) представницька
комірка для алюмінієвої матриці
з включеннями у формі
вуглецевих включень-волокон



(г) представницька
комірка для алюмінієвої матриці
з включеннями у формі сталевих
порожнистих сфер

Рисунок 5.4 – Репрезентативні комірки

На рисунку 5.4 а) показана типова комірка для алюмінієвої матриці зі сталевими включеннями у формі наносфер (кульок) діаметром $d = 5-15$ нм, з об'ємною часткою нановключень $V = 0,2$ від об'єму матриці. На рисунку 5.4.б) показана типова комірка для алюмінієвої матриці з включеннями у формі сталевих включень-волокон діаметром 5 нм, відносною довжиною $L / d = 5$, об'ємною часткою нановключень $V = 0,2$ від об'єму матриці. На рисунку 5.4.в) показана типова комірка для алюмінієвої матриці з включеннями у формі вуглецевих включень-волокон діаметром 5 нм, відносною довжиною $L / d = 5$, об'ємною часткою нановключень $V = 0,2$ від об'єму матриці. На рисунку 5.4.г) представлена типова комірка для алюмінієвої матриці з включеннями у формі сталевих порожнистих сфер діаметром $d = 5-15$ нм і товщиною $h = 0,5$ нм, з об'ємною часткою нановключень $V = 0,2$ об'єму матриці.

Уточнена оцінка небезпеки сейсмічних та ударних навантажень потребує нових передових методів розрахунків статичної та динамічної міцності резервуарів²⁶⁵. Особливо актуальними є питання впливу

²⁶⁵ Smetankina N., Kravchenko I., Merculov V., Ivchenko D., Malykhina A. Modelling of bird strike on an aircraft glazing. In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Kritskiy, D. (eds) *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering*.

матеріалів, з яких виготовлені резервуари, на їх статичні та динамічні характеристики міцності, деформації, тиск рідини на стінки, зміну рівня наповнення. Тут заповнені рідиною резервуари, виготовлені з різних нанокompозитних матеріалів, розглядаються з використанням підходу, представленого в²⁶⁶. Метод базується на концепції репрезентативного об'ємного елемента. Розглянуто нанокompозити з алюмінієвою матрицею зі сталевією сферичністю (порожнистою та суцільною), а також сталевими та вуглецевими включеннями. Статичні та динамічні характеристики міцності оцінені методами кінцевих і граничних елементів.

Оцінка ефективного модуля пружності

Репрезентативні об'ємні елементи для дослідження таких матеріалів представлені на рисунку 1а)-1д). Рисунок 4.4 а) Для всіх репрезентативних об'ємних елементів розглядаються матриці з алюмінієвого сплаву, а об'ємна частка наносферних включень склала $V = 0,2$ від об'єму матриці.

Вважається, що матеріали сталевих включень матриці та наносфери є ізотропними. Щільність матриць і сталевих включень становить 2770 кг/м³ і 7800 кг/м³, а їх модуль Юнга 71 МПа і 200 МПа відповідно. У матриці алюмінієвого сплаву також враховано ортотропні включення вуглецевого волокна з густиною 1800 кг/м³, модулем Юнга $E_1 = 395$ МПа, $E_2 = E_3 = 6$ МПа, коефіцієнтом Пуассона $\nu_{12} = \nu_{13} = 0.2$, $\nu_{23} = 0.4$.

Далі за методикою, описаною в²⁶⁷ з класичними граничними умовами на поверхні розділу розраховано ефективні модулі пружності

Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer, Cham. 2020. Vol. 1113. P. 289–297. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5_25 [37].

²⁶⁶ Дегтярьов К. Г., Гнітько В. І., Стрельнікова О. О., Тонконоженко А. М. Розрахункові моделі для аналізу механічних властивостей тривимірних нанокompозитів на основі методів скінчених та граничних елементів. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2018. № 2. С. 43–54 [216]; Gnitko V., Degtyariov K., Karaiev A., Strelnikova E. Multi-domain boundary element method for axisymmetric problems in potential theory and linear isotropic elasticity. *WIT Transactions in Engineering Sciences. WIT Press: Southampton and Boston*. 2019. vol. 122. P. 13–25. URL: <https://doi.org/10.2495/BE410021> [218].

²⁶⁷ Дегтярьов К. Г., Гнітько В. І., Стрельнікова О. О., Тонконоженко А. М. Розрахункові моделі для аналізу механічних властивостей тривимірних нанокompозитів на основі методів скінчених та граничних елементів. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2018. № 2. С. 43–54 [216].

цих композитів. Деякі чисельні результати представлені в таблиці 5.4 Слід відзначити пружну анізотропію отриманих композиційних матеріалів.

Таблиця 5.4

Ефективний модуль пружності

Матеріал	Алюмінієвий сплав	композити			
		Сталеві кульки	Сталеві волокна	Сталеві сфери	Вуглецеві волокна
Щільність, кг/м ³	2770	3787	3759	2574	2574
E ₁ , МПа	71	86.344	86.580	57.906	56.404
E ₂ , МПа	71	86.665	86.854	58.088	62.112
E ₃ , МПа	71	86.505	86.494	57.921	59.823
ν ₁₂	0.33	0.3205	0.3193	0.3111	0.2727
ν ₁₃	0.33	0.3225	0.3219	0.3148	0.2819
ν ₂₃	0.33	0.3216	0.3230	0.3140	0.2868

Рівняння пружності для матриці та включень використовуються у такому вигляді:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}^D &= 0, \quad \boldsymbol{\sigma}^D = 2G^D [\nu^D / (1 - 2\nu^D) \text{tr}(\mathbf{e}^D) \mathbf{I} + \mathbf{e}^D], \\ 2\mathbf{e}^D &= \nabla \mathbf{u}^D + (\nabla \mathbf{u}^D)^T, \quad \text{tr}(\mathbf{e}^D) = e_{ii}^D. \end{aligned} \quad (5.1)$$

Тут індекс D = M відповідає матриці, а D = I – модулю пружності включення, $\mathbf{u}^D$ – вектор переміщень, G^D – модуль зсуву, $\boldsymbol{\sigma}^D$ – тензор напружень, $G^D = 0.5E^D / (1 + \nu^D)$, E^D та ν^D – модуль Юнга та коефіцієнт Пуассона. Ідеальними граничними умовами контакту є безперервність переміщень і зчеплення на поверхні розділу

$$\mathbf{U}_{int}^M = \mathbf{U}_{int}^I, \quad \mathbf{T}_{int}^M = \mathbf{T}_{int}^I. \quad (5.2)$$

У [216] було продемонстровано, що неklasичні граничні умови, включаючи ефекти поверхневого натягу, призводять до збільшення ефективного модуля пружності приблизно на 10%. Таким чином, нехтуючи поверхневим натягом, виходять нижчі оцінки ефективних модулів.

Результати чисельного моделювання, наведені в таблиці 5.4., показують зміцнення отриманих композиційних матеріалів при зниженні щільності. Розрахунки також показали, що найбільш значущим фактором є рівень об'ємного наповнення включеннями.

Статичний аналіз

Далі розглядаються пружні циліндричні оболонки з різних матеріалів. Пружні властивості цих матеріалів наведено в табл. 5.4. Вважається, що довжина оболонки дорівнює $L = 1,2$ м, її радіус $R = 1$ м, а товщина $h = 0,01$ м. Оболонки були заповнені рідиною (нафтою) до рівня $H = 1,0$ м. Оболонки з жорстко закріпленим дном розглядаються під гідростатичним тиском з прискоренням сили тяжіння $g = 9,812$ м/с². Застосовується метод скінченних елементів, у чисельному моделюванні використано 13865 скінченних елементів²⁶⁸. Подальше збільшення кількості елементів не призвело до істотної зміни результатів. На рисунку 5.5 а) зображено кінцево-елементну сітку, на рисунку 5.5 б) – осьові деформації, а числові значення осьових деформацій наведено в таблиці 5.5.

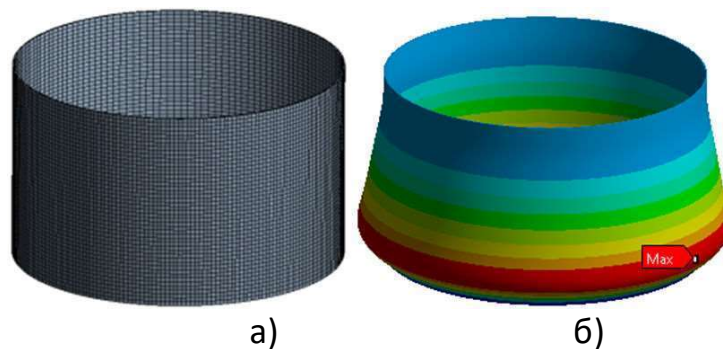


Рисунок 5.5 – Сітка скінченних елементів і осьові деформації

Таблиця 5.5

Осьові деформації

Матеріал	Алюмінієвий сплав	Композити			
		Сталеві кульки	Сталеві волокна	Сталеві сфери	Вуглецеві волокна
Осьова деформація, 10^{-6} м	11.484	9.449	9.463	14.177	14.467

Найменші деформації для розглянутих матеріалів відповідають композиту зі сферичними сталевими твердими включеннями.

²⁶⁸ Sierikova O., Koloskov V., Degtyarev K., Strelnikova E. Improving the Mechanical Properties of Liquid Hydrocarbon Storage Tank Materials. *Materials Science Forum*. 2022. Vol. 1068. P. 223–229. DOI: 10.4028/p-888232 [202].

Модальний аналіз

Розглянуто вільні та вимушені коливання пружних оболонок обертання, частково заповнених ідеальною нестисливою рідиною. Досліджено малі гармонійні коливання пружної оболонки в лінійній постановці. Для вирішення задач вільної та вимушеної вібрації конструкцій оболонки з відсіками, що містять рідину, використовується метод заданих мод²⁶⁹. Його суть полягає в наступному. Отримано зв'язану систему диференціальних рівнянь щодо пружних переміщень конструкції та тиску рідини. Три набори основних функцій були використані для побудови представлення системного рішення. Перший з них складається з власних режимів структури без рідини. Другий і третій базові набори функцій використовуються для представлення потенційних швидкостей і тиску рідини на змочену поверхню конструкції. Потенціал швидкості описується сумою двох «часткових» потенціалів. Одна з них описує власні коливання рідини в твердому резервуарі з урахуванням сили тяжіння. Другий набір відноситься до власних коливань пружної оболонки з рідиною без урахування сил гравітації. Система рівнянь руху символічно записується у вигляді

$$\mathbf{L}(\mathbf{U}) + \mathbf{M}(\ddot{\mathbf{U}}) = \mathbf{P}, \quad (5.3)$$

де $\mathbf{U}(x, y, z, t)$ є вектором переміщення, $\mathbf{L}$, $\mathbf{M}$ є операторами пружних і масових сил, $\mathbf{P} = p\mathbf{n}$ це тиск рідини на зволожену поверхню оболонки, $\mathbf{n}$ є одиницею зовнішньої нормалі до поверхні. Припустимо, що рідина ідеальна, нестислива, а її потік (спричинений рухом оболонки) безвихровий. За цих припущень існує потенціал швидкості φ , який задовольняє рівняння Лапласа з граничними умовами на пружних стінках оболонки S_1 і вільній поверхні S_0 , як показано нижче

$$\Delta\varphi = 0, \quad \frac{\partial\varphi}{\partial\mathbf{n}} = (\mathbf{U}, \mathbf{n})|_{S_1}, \quad \frac{\partial\varphi}{\partial\mathbf{n}} = \frac{\partial\zeta}{\partial t}\Big|_{S_0}, \quad p - p_0|_{S_0} = 0. \quad (5.4)$$

Тут $\zeta = \zeta(x, y, t)$ – невідома функція, що описує рівень і розташування вільної поверхні, p_0 – атмосферний тиск. За інтегралом Бернуллі можна отримати наступне співвідношення для оцінки тиску²⁷⁰:

²⁶⁹ Там само [202].

²⁷⁰ Gnitko V., Degtyariev K., Naumenko V., Strelnikova E. BEM and FEM analysis of the fluidstructure interaction in tanks with baffles, *Int. Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. 2017. Vol. 5 (3). P. 317–328. URL: <https://doi.org/10.2495/CMEM-V5-N3-317-328> [204]; Gnitko V., Degtyariev K., Karaiev A., Strelnikova E. Multi-domain boundary element method for axisymmetric problems in potential theory and linear isotropic elasticity. WIT

$$p - p_0 = -\rho_l \left[\frac{\partial \varphi}{\partial t} + a_x(t)x + (g + a_z(t))z \right], \quad (5.5)$$

де g це прискорення сили тяжіння, ρ_l – густина рідини, $a_x(t)$, $a_z(t)$ є рушійною силою прискорення в горизонтальному і вертикальному напрямках.

Наступне представлення режимів власної вібрації $\mathbf{U}(x, y, z, t)$ оболонки з рідиною було використано:

$$\mathbf{U}(x, y, z, t) = \sum_{k=1}^m c_k(t) \mathbf{u}_k(x, y, z), \quad (5.6)$$

де $\mathbf{u}_k(x, y, z)$ є власними модами коливань незаповненої оболонки, $c_k(t)$ є невідомими коефіцієнтами, що залежать лише від часу.

Це було запропоновано в²⁷¹ представити потенціал швидкості φ як суму двох потенціалів $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$ з наступними рядами з невідомими коефіцієнтами $c_k(t)$ та $d_k(t)$:

$$\varphi_1(x, y, z, t) = \sum_{k=1}^m \dot{c}_k(t) \varphi_{1k}(x, y, z), \quad (5.7)$$

$$\varphi_2(x, y, z, t) = \sum_{k=1}^n \dot{d}_k(t) \varphi_{2k}(x, y, z). \quad (5.8)$$

Ось основні функції φ_{1k} та φ_{2k} визначаються як розв'язки наступних крайових задач:

$$\nabla^2 \varphi_{1k} = 0, \quad \frac{\partial \varphi_{1k}}{\partial \mathbf{n}} = (\mathbf{u}_k, \mathbf{n})|_{S_1}, \quad \varphi_{1k} = 0|_{S_0}, \quad (5.9)$$

$$\nabla^2 \varphi_{2k} = 0, \quad \frac{\partial \varphi_{2k}}{\partial \mathbf{n}} = 0|_{S_1}, \quad \frac{\partial \varphi_{2k}}{\partial \mathbf{n}} = \frac{\chi_k^2}{g} \varphi_{2k} \Big|_{S_0}. \quad (5.10)$$

Припустимо, що в початковий момент положення вільної поверхні було $z = H$, з розв'язків крайових задач (9) і (10) отримано, що рух вільної поверхні рідини визначається наступною формулою:

$$\zeta = \sum_{k=1}^n d_k(t) \frac{\partial \varphi_{2k}(x, y, H)}{\partial \mathbf{n}} + \sum_{k=1}^m c_k(t) \frac{\partial \varphi_{1k}(x, y, z)}{\partial \mathbf{n}}. \quad (5.11)$$

Для визначення невідомих коефіцієнтів $c_k(t)$ та $d_k(t)$, використовується динамічна гранична умова на вільній поверхні в (4), а також рівняння руху (3). З динамічної умови в (4) і подання (5) для тиску отримано наступне диференціальне співвідношення:

$$\sum_{k=1}^n \ddot{d}_k(t) \varphi_{2k}(x, y, H) + g \sum_{j=1}^m c_j(t) \frac{\partial \varphi_{1j}(x, y, z)}{\partial \mathbf{n}} +$$

Transactions in Engineering Sciences. WIT Press: Southampton and Boston. 2019. vol. 122. P. 13–25. URL: <https://doi.org/10.2495/BE410021> [218].

²⁷¹ Sierikova O., Koloskov V., Degtyarev K., Strelnikova E. Improving the Mechanical Properties of Liquid Hydrocarbon Storage Tank Materials. *Materials Science Forum*. 2022. Vol. 1068. P. 223–229. DOI: 10.4028/p-888232 [202].

$$+(g + a_z(t)) \sum_{k=1}^n d_k(t) \frac{\partial \varphi_{2k}(x,y,H)}{\partial \mathbf{n}} + a_x(t)x = 0. \quad (5.12)$$

Після скалярного добутку цього співвідношення на функції φ_{2l} , внаслідок ортогональності власних мод рідини в жорсткому резервуарі отримано рівняння:

$$\ddot{d}_l(t) + \kappa_l^2 d_l(t) + A_l(g + a_z(t)) \sum_{k=1}^m c_k(t) \left(\frac{\partial \varphi_{1k}}{\partial \mathbf{n}}, \varphi_{2l} \right) + A_l a_x(t)(x, \varphi_{2l}) = 0, \quad l = 1, 2, \dots, n, \quad (5.13)$$

де $A_l = (\varphi_{2l}, \varphi_{2l})$.

Розглядаючи рівняння руху (3), слід зазначити, що застосовано умови ортогональності власних мод, а саме

$$\mathbf{L}\mathbf{u}_k = \omega_k^2 \mathbf{M}\mathbf{u}_k, \quad (\mathbf{M}\mathbf{u}_k, \mathbf{u}_j) = \delta_{kj} \quad (5.14)$$

де ω_k – власна частота, що відповідає моді $\mathbf{u}_k$ незаповненої оболонки. Після скалярного добутку рівнянь (5.13) на $\mathbf{u}_j$ з урахуванням співвідношень (5.15) і (3.14) отримано

$$\ddot{c}_j(t) + \omega_j^2 c_j(t) + \rho_l \sum_{k=1}^m \ddot{c}_k(\varphi_{1k}, w_j) + \rho_l \left[\sum_{i=1}^n \ddot{d}_i(\varphi_{2i}, w_j) + g(z, w_j) + a_s(t)(x, w_j) \right] = 0, \quad (5.15)$$

Тут $j = 1, m$, $w_j = (\mathbf{u}_j, \mathbf{n})$.

Нарешті, система звичайних диференціальних рівнянь другого порядку (5.13), (5.15) відносно невідомих коефіцієнтів $c_k(t)$, $k = 1, \dots, m$ та $d_k(t)$, $k = 1, \dots, n$ було отримано. Оскільки передбачалося, що в початковий момент часу (наприклад, перед землетрусом або вибухом) система «пружна оболонка - рідина» перебувала в спокої, початкові умови прийнято нульовими.

$$\begin{aligned} c_k(0) &= \dot{c}_k(0) = 0, \quad k = 1, \dots, m, \\ d_k(0) &= \dot{d}_k(0) = 0, \quad k = 1, \dots, n. \end{aligned} \quad (5.16)$$

Таким чином, схема розв'язування зв'язаної динамічної задачі для заповнених рідиною оболонок обертання включає кілька етапів, кожен з яких має своє значення. Ці етапи такі:

- Визначення частот і форм вільних коливань незаповненої оболонки методом скінченних елементів (МСЕ).
- Визначення частот і режимів коливань рідини в твердій оболонці під дією сили тяжіння методом граничних елементів (МГЕ).
- Визначення частот і мод коливань пружної оболонки без урахування дії сили тяжіння граничним і кінцево-елементним методами.

- Розв'язування системи диференціальних рівнянь другого порядку методом Рунге-Кутта четвертого та п'ятого порядку.

5.6. Розробка моделі підвищення міцносних характеристик корпусу резервуару за рахунок використання нанокompозитів

За методикою, описаною в²⁷² розраховано ефективний модуль цих композитів. Результати розрахунків представлені в таблицях 5.6-5.8.

Таблиця 5.6

Властивості композиту, армованого сталевими кульками

Матеріал	Алюмінієвий сплав	Сталеві кульки	Композитний матеріал зі сталевими кульками
Щільність, кг / м ³	2770	7850	3787
Модуль Юнга X, ГПа	71	200	86,344
Модуль Юнга Y, ГПа	71	200	86,665
Модуль Юнга Z, ГПа	71	200	86,505
Коефіцієнт Пуассона XY	0,33	0,3	0,3205
Коефіцієнт Пуассона YZ	0,33	0,3	0,3225
Коефіцієнт Пуассона XZ	0,33	0,3	0,3216

Таблиця 5.7

Властивості композиту, армованого сталевими волокнами

Матеріал	Алюмінієвий сплав	Сталеві волокна	Композитний матеріал, сталеві волокна
Щільність, кг / м ³	2770	7850	3759
Модуль Юнга X, ГПа	71	200	86,580
Модуль Юнга Y, ГПа	71	200	86,854
Модуль Юнга Z, ГПа	71	200	86,494
Коефіцієнт Пуассона XY	0,33	0,3	0,3193
Коефіцієнт Пуассона YZ	0,33	0,3	0,3219
Коефіцієнт Пуассона XZ	0,33	0,3	0,3230

Таблиця 5.8

²⁷² Kushch V. I. Stress field and effective elastic moduli of periodic spheroidal particle composite with Gurtin-Murdoch interface. *International Journal of Engineering Science*. 2018. Vol. 132. P. 79–96. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2018.08.001> [203].

Властивості композиту з вуглецевим волокном

Матеріал	Алюмінієвий сплав	Вуглецеве волокно	Властивості композиту з вуглецевим волокном
Щільність, кг / мЗ	2770	1800	2574
Модуль Юнга X, ГПа	71	395	56,4
Модуль Юнга Y, ГПа	71	6	62,1
Модуль Юнга Z, ГПа	71	6	59,8
Коефіцієнт Пуассона XY	0,33	0,2	0,2727
Коефіцієнт Пуассона YZ	0,33	0,4	0,2819
Коефіцієнт Пуассона XZ	0,33	0,2	0,2868

Таблиця 5.9

Властивості композиту зі сталевими порожнистими сферами

Матеріал	Алюмінієвий сплав	сталеві порожнисті сфери	Властивості композиту зі сталевими порожнистими сферами
Щільність, кг / мЗ	2770	7850	2574
Модуль Юнга X, ГПа	71	200	57,906
Модуль Юнга Y, ГПа	71	200	58,088
Модуль Юнга Z, ГПа	71	200	57,921
Коефіцієнт Пуассона XY	0,33	0,3	0,3111
Коефіцієнт Пуассона YZ	0,33	0,3	0,3148
Коефіцієнт Пуассона XZ	0,33	0,3	0,3140

Результати розрахунків показали зміцнення отриманих композиційних матеріалів при зниженні щільності.

Забезпечено обробку композиційних матеріалів нановключеннями різної форми. У роботі розглянуто нанокомпозити з алюмінієвою матрицею зі сталевими сферичними включеннями та зі сталевими та вуглецевими включеннями-волокнами. Результати розрахунків показали зміцнення отриманих композиційних матеріалів при зниженні щільності. Поліпшення механічних властивостей матеріалів резервуарів для зберігання рідких вуглеводнів досягнуто за рахунок застосування нановключень. Нанокомпозитні матеріали полегшують конструкцію вуглеводневих резервуарів, що важливо для нестаціонарних резервуарів.

За описаною вище схемою побудовано три системи основних функцій. Перша система основних функцій відповідає модам

незаповненої циліндричної оболонки. Власні режими вібрації, що відповідають найнижчим частотам, показані на рисунку 5.6 а), найнижчі частоти перераховані в таблиці 5.10.

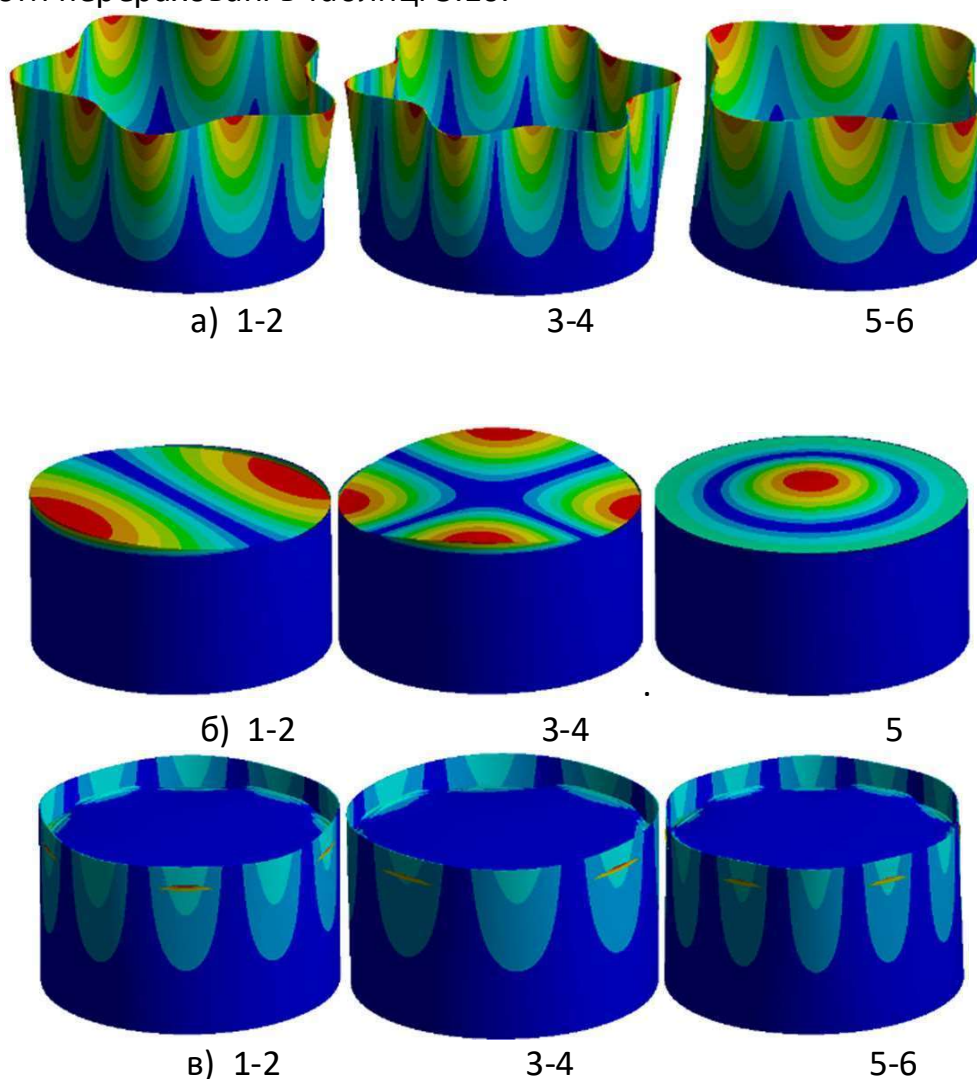


Рисунок 5.6 – Режимы вібрації

Таблиця 5.10

Найнижчі частоти порожньої оболонки, Гц

Хвильове число	Алюмінієвий сплав	Композити			
		Сталеві кульки	Сталеві волокна	Сталеві сфери	Вуглецеві волокна
5	90.575	85.431	85.791	85.073	84.676
6	100.36	94.567	94.974	93.599	93.644
4	103.52	97.751	98.153	97.874	96.986

По-перше, для чисельного моделювання власних мод і частот було припущено, що

$$c_k(t) = C_k \exp(i\Omega t), \quad d_k(t) = D_k \exp(i\Omega t), \quad (5.17)$$

де C_k , D_k євідомі константи, Ω – невідома частота зв'язаних коливань. Слід зазначити, що для оболонок обертання справедливе представлення для мод коливань у циліндричній системі координат:

$$\mathbf{u}_l(\rho, \theta, z) = \mathbf{u}_l(\rho, z) \cos l\theta + \mathbf{u}_l(\rho, z) \sin l\theta, \quad l = 0, 1, \dots \quad (5.18)$$

Тут l є хвильовим числом. З (5.18) можна зробити висновок, що для всіх ненульових гармонік існує декілька власних значень. Для отримання власних мод і частот незаповненої циліндричної оболонки використовується метод скінченних елементів²⁷³. Сітку кінцевих елементів показано на рисунку 5.5 а). Власні режими вібрації, що відповідають найнижчим частотам, показані на рисунку 5.6 а), найнижчі частоти перераховані в таблиці 5.10. Тут спостерігається цікаве явище. Найнижча частота архівується на хвильовому номері $l=5$, і ця частота кратна. Частота, яка відповідає осесиметричній моді ($l=0$), не є однією з найменших.

Далі була сформована друга система основних функцій в припущенні, що враховано плескання рідини в жорсткому баку. Застосовано акустичне наближення. При цьому моделюванні було використано 31928 акустичних скінченних елементів, подальше збільшення їх кількості не призвело до істотної зміни результатів. Для порівняння розрахунків також використовувався метод граничних елементів²⁷⁴. Вибрано 100 граничних елементів по циліндричній стінці, 100 елементів по радіусу дна і 120 елементів по радіусу вільної поверхні.

Обидві основні функції φ_{1l} та φ_{2l} у розкладах (5.17), (5.18) для часткових потенціалів φ_1, φ_2 в циліндричній системі координат можна представити у вигляді, подібному до (5.18)

$$\varphi_{jl}(\rho, \theta, z) = \varphi_{jl}(\rho, z) \cos l\theta + \varphi_{jl}(\rho, z) \sin l\theta, \quad (5.19)$$

$$l = 0, 1, \dots, j=1, 2.$$

²⁷³ Sierikova O., Koloskov V., Degtyarev K., Strelnikova E. Improving the Mechanical Properties of Liquid Hydrocarbon Storage Tank Materials. *Materials Science Forum*. 2022. Vol. 1068. P. 223–229. DOI: 10.4028/p-888232 [202].

²⁷⁴ Gnitko V., Degtyariv K., Naumenko V., Strelnikova E. BEM and FEM analysis of the fluidstructure interaction in tanks with baffles, *Int. Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. 2017. Vol. 5 (3). P. 317–328. URL: <https://doi.org/10.2495/CMEM-V5-N3-317-328> [204].

Найнижчі множинні частоти плескання відповідають хвильовому числу $l=1$. Слід зазначити, що частоти сплескування не залежать від пружних характеристик композиційних матеріалів принаймні при обраних співвідношеннях між геометричними характеристиками оболонки. У цьому випадку частота, що відповідає осесиметричному режиму ($l=0$), є однією з найменших.

На рисунку 5.6. б) показано режими плескання поверхні рідини. Найнижчі частоти плескання представлені в таблиці 5.11. В таблиці 5.12 наведені власні частоти гідропружних коливань оболонки, Гц.

Таблиця 5.11

Частота плескань вільної поверхні рідини, Гц

Хвильове число	1	1	2	2	0	3
FEM	0.6596	0.6596	0.8693	0.8693	0.9754	1.0216
BEM	0.6596	0.6596	0.8693	0.8693	0.9755	1.0243

Таблиця 5.12

Власні частоти гідропружних коливань оболонки, Гц

Хвильове число	Алюмінієвий сплав	Композити			
		Сталеві кульки	Сталеві волокна	Сталеві сфери	Вуглецеві волокна
10	48.029	50.565	50.625	43.828	43.692
8	51.617	54.682	54.732	47.349	47.023
11	54.902	57.646	57.723	49.792	49.851

Дані, наведені в таблиці 5.9, дозволяють зробити висновок про вірогідність отриманих результатів за рахунок порівняння власних частот, отриманих різними методами. Зауважено, що МГЕ вимагає значно меншої кількості елементів порівняно з МСЕ.

Тоді виходить третя система основних функцій. Для цього були проведені розрахунки в гідропружній постановці. Зазначимо, що потенціал швидкості запропоновано шукати у вигляді суми двох потенціалів $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$. У цьому випадку потенціал φ_2 відповідає плесканню вільної поверхні, і він знайдений як лінійна комбінація основних функцій другої системи. Потенціал φ_1 відповідає коливанням пружної оболонки з рідиною, але без урахування рухів вільної поверхні, і зображується як лінійна комбінація основних функцій третьої системи.

Для визначення цих базових функцій також можна використовувати об'єднані кінцеві виміри та конвеєри.

В таблиці 5.12 наведено власні частоти коливань оболонки з урахуванням пружності стінок. Тут розрахунок виконано за допомогою МСЕ. На рисунку 5.6 в) показано відповідні режими коливань.

З наведених результатів можна зробити висновок, що режими коливань оболонок з різних матеріалів однакові, а різниця в частотах коливань досягає 5-7 відсотків, що може бути істотним при проведенні відстроювання від резонансу. З результатів таблиць 5.10 – 5.12 випливає, що частоти, отримані з додаванням рідких мас, є частотами порожньої оболонки. Важливо, щоб найнижчі частоти коливань наповнених і порожніх оболонок відповідали різним гармонікам.

Використання композитних матеріалів із нановключеннями в резервуарах для зберігання рідких вуглеводнів, дозволяє підвищити надійність резервуарів в умовах сейсмічних навантажень та продовжити їх експлуатаційний строк при дії природних та техногенних впливів різного характеру. Результати розрахунків показали, що використання композитних матеріалів із нановключеннями у вигляді сталевих сфер є найкращим варіантом для екологічно безпечної експлуатації резервуарів при сейсмічних навантаженнях.

Проведені розрахунки дозволили побудувати необхідні системи основних функцій для дослідження вимушених коливань, а також впливу поверхневого натягу та нелінійних ефектів на коливання оболонок з рідиною.

5.7. Оцінка адекватності математичної моделі фактичним даним досліджень власних частот гідропружних коливань оболонки для типового резервуару зберігання рідких вуглеводнів

Відповідно до ідеї роботи для підвищення сейсмостійкості резервуарів пропонується застосування у якості матеріалів каркасу композитних матеріалів з нановключеннями різної форми. У зв'язку з цим на даному етапі роботи проведено дослідження особливостей коливань резервуарів із композитних матеріалів та вивчено динамічні характеристики конструкцій резервуара за різних конструктивних параметрів матеріалу каркасу та експлуатаційних умов.

Основною метою даного етапу дослідження є визначення динамічних характеристик конструкцій резервуара та оцінка сейсмостійкості його в цілому при різних конструктивних параметрах та різних рівнях наливу рідини в резервуар.

Порівняння результатів розрахунку з експериментальними даними наведено в таблиці 5.13.

Таблиця. 5.13

Власні частоти гідропружних коливань оболонки для типового резервуару об'ємом 3000 м³, Гц

Власні частоти коливань оболонки резервуару, Гц	Експериментальні значення власних частот коливань оболонки резервуару, Гц	Алюмінієвий сплав	Композити, розрахункові дані, Гц			
			Сталеві кульки	Сталеві волокна	Сталеві сфери	Вуглецеві волокна
5,791	4,8025	4.8029	5.0565	5.0625	4.3828	4.3692
5,8352	5,3372	5.1617	5.4682	5.4732	4.7349	4.7023
5,9042	5,7920	5.4902	5.7646	5.7723	4.9792	4.9851

Власні частоти коливань стінки резервуару з композитних матеріалів зменшуються. Так для порівняння, якщо частота власних коливань резервуара становила 5,8352 Гц, то резервуара з композитних матеріалів із включеннями вуглецевих волокон, частота коливань становила 4,7023 Гц.

Результати проведеного дослідження обґрунтовують можливість регулювання динамічними характеристиками резервуару з композитних матеріалів, а отже підбором конструктивних параметрів композиту підвищувати сейсмостійкість резервуара в цілому. Частоти коливань резервуару з нанокомпозитного матеріалу зменшилися від 7 % до 18 % порівняно зі сталевим резервуаром, тобто підвищення сейсмостійкості резервуару можливе на 7-18 %.

Результати аналізу даних таблиці 5.13 показує задовільну збіжність значень частот (в межах від 5 % до 12 %) отриманих у розрахунках та в експериментальних випробуваннях моделей резервуара. Даний факт показує достовірність вибраних розрахункових моделей та отриманих теоретичним шляхом значень частот коливань,

а також обґрунтовує запропоновану методику розрахунку частот та форм коливань резервуара.

Дані експериментальних досліджень узяті із праці Tursunkululy, T., Zhangabay, N., Avramov, K., Chernobryvko, M., Suleimenov, U., Utelbayeva, A., Duissenbekov, B., Aikozov, Y., Dautbek, B., Abdimanat, Z.²⁷⁵.

²⁷⁵ Tursunkululy, T., Zhangabay, N., Avramov, K., Chernobryvko, M., Suleimenov, U., Utelbayeva, A., Duissenbekov, B., Aikozov, Y., Dautbek, B., Abdimanat, Z. (2022). Strength analysis of prestressed vertical cylindrical steel oil tanks under operational and dynamic loads. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2 (7 (116)): 14–21. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254218> [310].

РОЗДІЛ 6

РОЗРОБКА СИСТЕМНОГО ПІДХОДУ ДО ОЦІНКИ ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ ВІД ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ЗБЕРІГАННЯ РІДКИХ ВУГЛЕВОДНІВ В РЕЗЕРВУАРАХ ПРИ СЕЙСМІЧНИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

6.1. Підходи до зниження техногенного впливу на довкілля резервуарів зберігання рідких вуглеводнів

Загальним підходом до зниження техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях є комплексний підхід, який включає інженерні та управлінські заходи.

Існує ряд інженерних підходів до зниження техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях, що досліджується в роботі.

1) Встановлення мембрани призводить до значного зниження як рівня підйому вільної поверхні, так і тиску на стінки бака. Ці дані можуть бути корисними для оцінки стабільності резервуарів при сейсмічних навантаженнях.

2) Перегородки для гасіння плескань рідких вуглеводнів встановлюються усередині резервуара. У разі землетрусу перегородки перешкоджають вільному переміщенню рідини, запобігаючи виплескуванням та розливам.

3) В роботах авторки розглянуто нанокompозити з алюмінієвою матрицею зі сталевими сферичними включеннями та зі сталевими та вуглецевими включеннями-волокнами. Результати розрахунків показали зміцнення отриманих композиційних матеріалів при зниженні щільності. Поліпшення механічних властивостей матеріалів резервуарів зберігання рідких вуглеводнів досягнуто за рахунок застосування нановключень. Нанокompозитні матеріали полегшують конструкцію вуглеводневих резервуарів.

4) Армування ґрунтових основ вертикальними ґрунто-цементними елементами підвищує їх міцність та стійкість до

деформацій, що дозволяє резервуарам краще протистояти сейсмічних навантаженням.

Крім інженерних підходів, існує ряд управлінських заходів, які можуть допомогти зменшити техногенний вплив на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях.

1) Моніторинг природних та техногенних сейсмічних навантажень дозволяє прогнозувати сейсмічні події та розробляти заходи щодо їх пом'якшення.

2) Зменшення підсилюючих факторів сейсмічної небезпеки, таких як підтоплення та обводнення ґрунтів, вплив інших техногенних об'єктів на резервуари зберігання рідких вуглеводнів, врахування при будівництві резервуарів рідких вуглеводнів слабких ґрунтів геологічних та гідрогеологічних умов, також може допомогти зменшити техногенний вплив на довкілля.

3) **Моніторинг стану резервуарів зберігання рідких вуглеводнів**
Регулярний моніторинг стану резервуарів зберігання рідких вуглеводнів дозволяє своєчасно виявити пошкодження та вжити заходів щодо їх усунення.

4) **Попередження пожежі та вибухонебезпеки**

Попередження пожежі та вибухонебезпеки також є важливим заходом щодо зниження техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях. Тому на основі проведенного дослідження пожеж та вибухонебезпеки на РЗРВ, визначено та систематизовано причини виникнення пожеж та аварій на резервуарах зберігання рідких вуглеводнів.

Важливим також є підвищення рівня підготовки персоналу, відповідального за експлуатацію резервуарів для недопущення аварійних ситуацій через «людський фактор»²⁷⁶.

²⁷⁶ Yatsyshyn T., Polutrenko M., Poberezhny L., Maruschak P., Martynyuk R. Assessment of factors of technogenic and environmental risks at particular stages of the life cycle of oil and gaswells. *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 36. P. 362-369. URL: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.047> [1]; Tang L., Zhang M., Wen L. Support vector machine classification of seismic events in the Tianshan orogenic belt. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2020. 125. e2019JB018132. URL: <https://doi.org/10.1029/2019JB018132> [2]; Kendzera O. V., Mykulyak S. V., Semenova Yu. V., Skurativska I. A., Skurativskyi S. I. Assessment of



Рисунок 6.1 – Підходи до зниження техногенного впливу на довкілля РЗРВ при сейсмічних навантаженнях

seismic response of a soil layer with the oscillating inclusions. *Geophysical journal*. 2020. Vol. 42 (4). P. 47–58 [3]; Kendzera O. V., Mykulyak S. V., Semenova Yu. V., Skurativska I. A., Skurativskyi S. I. Seismic response of a layered soil deposit with inclusions. *Geophysical journal*. 2021. Vol. 43 (2). P. 3–13 [4]; Gryn D. M. Seismic hazard of the territory of Ukraine. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2023. Vol. (6). P. 25–33. URL: <https://doi.org/10.15407/visn2023.06.025> [5]; Кендзера О. В., Пигулевский П. Г., Андрущенко Ю. А. Особливості сейсмічності території Кривбасу. Доп. НАН України. 2021. № 6. С. 87–96. URL: <https://doi.org/10.15407/dopovid12021.06.087> [6]; Онищенко В. О., Винников Ю. Л., Зоценко М. Л., Харченко М. О., Ларцева І. І., Бредун В. І., Нестеренко Т. М. Ефективні конструктивно-технологічні рішення об'єктів зберігання нафти і нафтопродуктів у складних інженерно-геологічних умовах: монографія. Полтава: ФОП Пусан А. Ф. 2019. 233 с. [7]; Гордієнко Ю. О., Каплаушенко В. М. Сучасні інформаційно-комп'ютерні технології та мережа сейсмічних спостережень ГЦСК щодо упередження максимального сейсмічного ефекту від землетрусу в ближній зоні. *Вісник ЖДТУ. Сер. «Технічні науки»*. 2017. № 3 (38). С. 61–71. URL: [https://doi.org/10.26642/tn-2006-3\(38\)-61-71](https://doi.org/10.26642/tn-2006-3(38)-61-71) [8]; ДБН В.1.1-12:2014 Будівництво у сейсмічних районах України. Київ: Мінрегіонбуд України, 2014. 110 с. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-1083#load> [9].

6.2. Системний підхід до управління факторами, що підсилюють сейсмічну небезпеку в місцях розташування резервуарів зберігання рідких вуглеводнів

Процес управління факторами складається з семи етапів:

- **Визначення факторів впливу.** На першому етапі необхідно визначити всі фактори, які можуть впливати на сейсмічну небезпеку резервуарів зберігання рідких вуглеводнів. Ці фактори можна розділити на природні та техногенні. Природні фактори включають: сейсмічність території, особливості геологічної будови місць розташування РЗРВ, наявність змін в геологічній будові, вплив вітру, опадів та температурних перепадів, положення рівня ґрунтових вод, обводнення ґрунтів, підтоплення та інш. Техногенні фактори включають: діяльність людини, яка може призвести до зміни природних умов, наприклад, будівництво промислових об'єктів, видобуток корисних копалин, техногенні сейсмічні впливи, вплив техногенних об'єктів та ін.

- **Визначення лідируючих факторів впливу.** На другому етапі необхідно визначити, які фактори впливу є найбільш значущими для резервуару зберігання рідких вуглеводнів. Для цього можна використовувати методи аналізу ризиків, такі як метод експертних оцінок або метод дерева рішень.

- **Врахування природних умов.** При проектуванні резервуарів зберігання рідких вуглеводнів необхідно враховувати природні умови, що впливають на сейсмічну небезпеку. Це дозволяє розробити більш безпечну конструкцію резервуару, яка буде здатна витримати сейсмічні навантаження різної сили та походження.

- **Моделювання та врахування впливів природних і техногенних факторів.** Для прогнозування впливів природних і техногенних факторів на сейсмічну небезпеку резервуарів зберігання рідких вуглеводнів можна використовувати різні методи моделювання. До таких методів відносяться: моделювання сейсмічних хвиль, яке дозволяє визначити амплітуду та частоту сейсмічних коливань, що досягнуть резервуара, моделювання поведінки резервуару, яке дозволяє визначити деформації та напруги в резервуарі під впливом сейсмічних коливань.

- **Прогнозування впливів різних факторів.** За результатами моделювання можна прогнозувати впливи різних факторів на сейсмічну небезпеку резервуара. Це дозволяє розробити заходи щодо зниження

техногенного впливу на довкілля резервуарів зберігання рідких вуглеводнів.

• **Управління лідируючими факторами впливу на сейсмічну небезпеку.** На основі прогнозів впливів різних факторів можна розробити заходи щодо управління лідируючими факторами впливу на сейсмічну небезпеку. До таких заходів відносяться: зменшення ваги резервуара при зберіганні міцносних характеристик, наприклад, за рахунок використання легких матеріалів, нанокompозитних матеріалів або зменшення розмірів резервуара; покращення конструкції резервуара, наприклад, за рахунок застосування додаткових елементів зміцнення; усунення техногенних факторів, що впливають на сейсмічну небезпеку, наприклад, за рахунок припинення будівництва промислових об'єктів або видобутку корисних копалин, що супроводжуються підземними вибухами у зоні сейсмічної небезпеки.

• **Моніторинг та аналіз результатів управління.** Для забезпечення ефективності заходів щодо управління факторами, що підсилюють сейсмічну небезпеку, необхідно проводити моніторинг та аналіз результатів управління. Це дозволяє своєчасно виявляти та усунути недоліки в розроблених заходах (Рисунок 6.2).



Рисунок 6.2 – Системний підхід до управління факторами, що підсилюють сейсмічну небезпеку в місцях розташування резервуарів зберігання рідких вуглеводнів

Резервуари для зберігання отруйних та легкозаймистих рідин (РЗОЛР) є надзвичайно важливою системою, яка широко використовується в різних галузях промисловості. Особливої гостроти в останні роки набуває проблема слабосейсмічних і несейсмічних територій, схильних до техногенних землетрусів, викликаних підземними вибухами, видобутком корисних копалин і антропогенними впливами. Основними факторами природно-техногенної сейсмічної обстановки територій міст та інших населених пунктів є складна структурно-тектонічна та геолого-літологічна будова територій, розвиток небезпечних геологічних процесів. Під час землетрусів природного або техногенного походження, резервуари для зберігання рідини не тільки негативно впливають на довкілля, але й можуть спричинити пожежі, вибухи, ядерні витoki, отруєння людей і тварин тощо. Дослідження природних і техногенних впливів на резервуари для зберігання рідини може зменшити екологічну небезпеку систем зберігання отруйних та легкозаймистих рідин.

У більшості випадків за звичайних умов отруйні та легкозаймисті речовини перебувають у газоподібному або рідкому стані. Проте при виробництві, використанні, зберіганні і перевезенні газоподібні, як правило, стискають, приводячи в рідкий стан. Це різко скорочує займаний ними об'єм. Результатом зовнішнього природного чи техногенного впливу може бути порушення герметичності резервуару, його пошкодження чи руйнування. При аварії чи пошкодженні резервуару в атмосферне повітря викидаються отруйні речовини. Потрапляння отруйних та легкозаймистих рідин з резервуарів для їх зберігання в навколишнє природне середовище (НПС) та їх подальше розповсюдження на територію населених пунктів може бути причиною масових отруєнь людей, тварин, привести до забруднення об'єктів довкілля. Існує також можливість реалізації пожежної небезпеки об'єкта і ризику загибелі людей в результаті впливу небезпечних факторів пожежі у резервуарі для збереження отруйних та легкозаймистих рідин. Залежно від масштабів зараження аварії підрозділяються на приватні, об'єктові, місцеві, регіональні і глобальні.²⁷⁷ Тому актуальним завданням є забезпечення екологічної безпеки резервуарів зберігання отруйних та легкозаймистих рідин.

²⁷⁷ Yatsyshyn T., Polutrenko M., Poberezhny L., Maruschak P., Martynyuk R. Assessment of factors of technogenic and environmental risks at particular stages of the life cycle of oil and gaswells. *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 36. P. 362-369. URL: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.047> [1]; Tang L., Zhang M., Wen L. Support vector machine classification of seismic events in the Tianshan orogenic

Прогнозування впливу та аналіз техногенної небезпеки резервуару для збереження отруйних та легкозаймистих рідин передбачає²⁷⁸:

- аналіз пожежної небезпеки технологічної схеми і параметрів технологічних процесів на об'єкті;
- визначення частоти реалізації пожежонебезпечних аварійних ситуацій та параметрів для кожного технологічного процесу;
- побудова полів небезпечних факторів пожежі для різноманітних сценаріїв її розвитку;
- оцінка наслідків впливу небезпечних факторів пожежі на людей за різними сценаріями розвитку пожежі;
- наявність систем забезпечення пожежної безпеки²⁷⁹;
- оцінку технічного стану резервуару;
- оцінку стану НПС поблизу резервуару та можливість впливу на стан резервуару;
- оцінку реального та потенційного впливу резервуару на НПС;
- планування та впровадження управлінських та інженерних заходів із попередження техногенного впливу на резервуар;
- контроль за дотриманням вимог попередження техногенного впливу на резервуар;
- планування та впровадження управлінських та інженерних заходів із попередження негативного впливу резервуару на НПС та виникнення НС;
- контроль за дотриманням вимог попередження негативного впливу резервуару на НПС та виникнення НС.

6.3. Наукові засади моніторингу стану екологічної небезпеки сейсмічних навантажень на резервуари зберігання рідких вуглеводнів

Певні природні та антропогенні процеси можуть стати причиною екологічної небезпеки, окремо або взаємодіючи один з одним. Характер та поява цієї небезпеки залежатимуть від багатьох чинників та умов. Ймовірність реалізації цих процесів може варіюватись в

belt. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2020. 125. e2019JB018132. URL: <https://doi.org/10.1029/2019JB018132> [2].

²⁷⁸ Там само [1]; [2].

²⁷⁹ Там само [1]; [2].

широкому діапазоні, включаючи практично нульову вірогідність. Для забезпечення екологічної безпеки важливо запобігати або усувати негативний вплив факторів, що виникають внаслідок роботи джерел небезпеки. Це підкреслює необхідність всебічного вивчення умов формування екологічної небезпеки, включаючи проведення моніторингу її станів. Цей моніторинг дозволить нам розуміти і передбачати можливі прояви небезпеки та розробляти ефективні заходи для забезпечення екологічної безпеки. Моніторинг станів екологічної небезпеки доцільно проводити базуючись на принципах системного аналізу²⁸⁰.

В роботі було запропоновано враховувати в управлінні впливами природних та техногенних факторів на РЗОЛР моделі прогнозів сейсмічних навантажень та коливань рідин в РЗОЛР використовуючи алгоритм дій у ході проведення моніторингу за сейсмічними навантаженнями на резервуари для збереження отруйних та легкозаймистих рідин (Рисунок 6.3).

Для задовільної роботи такого алгоритму запропоновано враховувати територію розміщення резервуару як потенційно забруднену в разі, коли прогнози щодо параметрів резервуарів не відповідають розрахункам протягом всього експлуатаційного терміну. Важливим та обов'язковим вважаємо врахування даних та прогнозів про сейсмічні зміни на території розташування РЗОЛР, про умови розташування резервуарів, про техногенні та природні впливи на резервуари та умов збереження отруйних та легкозаймистих рідин в комплексі необхідних заходів щодо забезпечення цілісності резервуару та мінімізації його впливу на навколишнє природне середовище²⁸¹.

Для управління впливом на навколишнє природне середовище (НПС) резервуарів для збереження отруйних та легкозаймистих рідин було розроблено алгоритм дій при пошкодженні, руйнуванні та порушенні герметичності резервуарів для збереження отруйних та легкозаймистих рідин під дією техногенних та природних факторів (Рисунок 6.4).

²⁸⁰ Харламова О. В. Науково-методологічні основи управління екологічною безпекою в умовах природно-антропогенного навантаження : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 21.06.01. Суми, 2018. 38 с. [297].

²⁸¹ Серікова О. М., Стрельнікова О. О., Колосков В. Ю. Підвищення рівня екологічної безпеки забудованих територій України, схильних до підтоплення : монографія. Харків : НУЦЗ України, 2020. 142 с. [63].

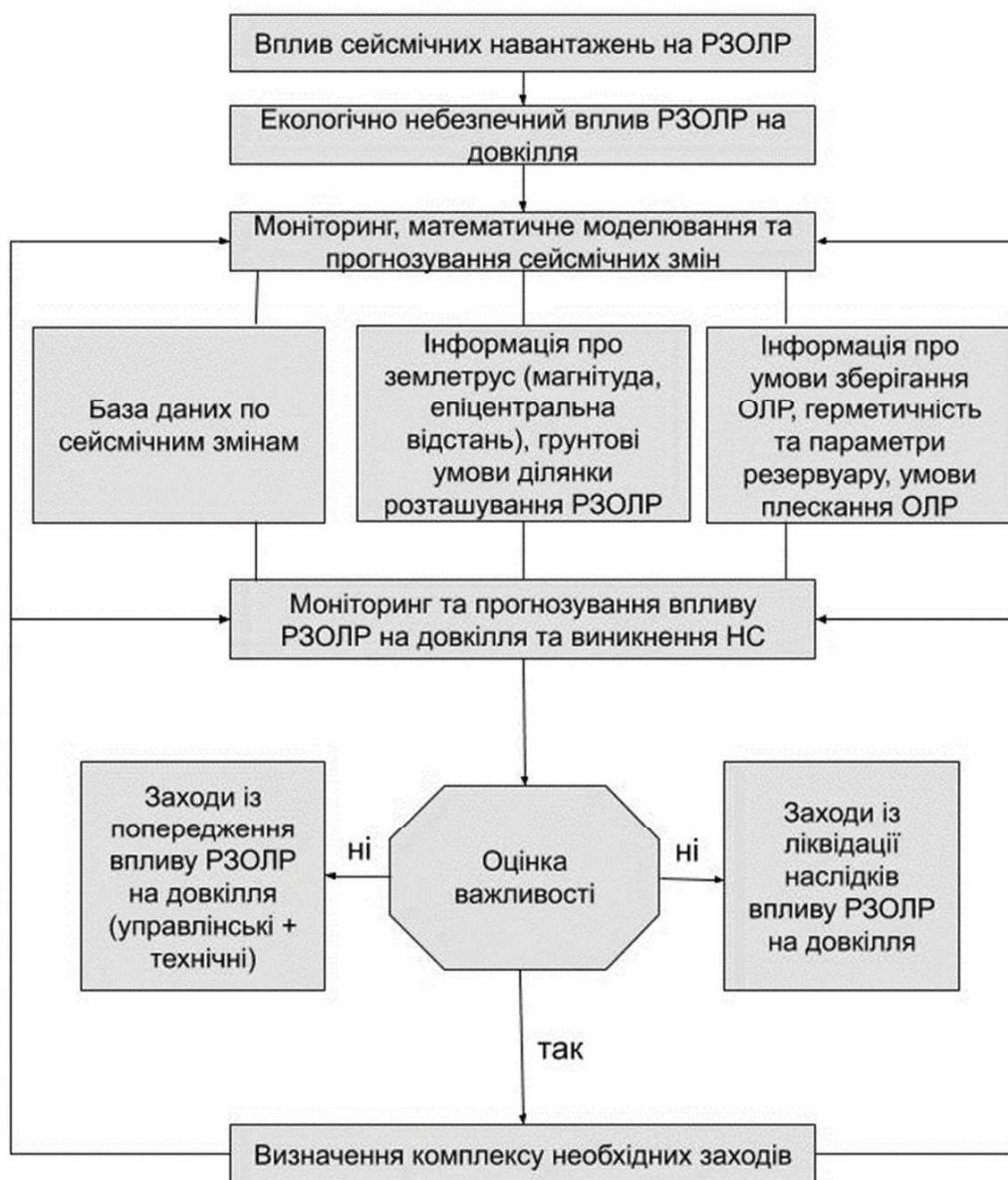


Рисунок 6.3 – Алгоритм дій у ході проведення моніторингу за сейсмічними навантаженнями на резервуари для збереження отруйних та легкозаймистих рідин

Алгоритм дій при пошкодженні, руйнуванні та порушенні герметичності резервуарів для збереження отруйних та легкозаймистих рідин під дією техногенних та природних факторів може бути наступним:

1. Встановлення системи моніторингу: Резервуари повинні бути обладнані системами моніторингу, які виявляють будь-які витoki або порушення герметичності. Це можуть бути датчики тиску, датчики температури, системи виявлення газів тощо.

2. Виявлення пошкоджень: У разі виявлення витoku або порушення герметичності, система моніторингу повинна негайно сповістити відповідні відділи оперативної служби. Це можна зробити за допомогою автоматичних повідомлень, або алармування через систему сповіщення.

3. Ізоляція зони: Негайно потрібно відокремити зону пошкодження від людей та навколишнього середовища. Закрийте резервуари, якщо це можливо, вимкніть системи подачі палива або розрядження газу.

4. Оцінка збитків: Проведіть оцінку розміру збитків і ризиків. Це включає виявлення можливого розповсюдження викидів та їх можливих наслідків для навколишнього середовища та населення. Аналізуйте можливі шляхи для мінімізації пошкоджень.

5. Запуск аварійного плану: У активізації аварійного плану мають брати участь відповідні рятувальні служби та експерти. Вони повинні вжити необхідних заходів для запобігання подальшому поширенню забруднення та забезпечення безпеки персоналу та населення.

6. Зменшення небезпеки: Провести заходи для мінімізації небезпеки, такі як зупинка процесів зберігання чи передачі рідин, зниження тиску у системі, забезпечення належної вентиляції та використання захисного обладнання.

7. Санація і відновлення: Після припинення пошкоджень провести санацію забруднених ділянок і відновлення резервуарів до нормального стану.

На відміну від інших, даний алгоритм (Рисунок 6.4) дозволяє враховувати окрім забруднених територій, що потребують ліквідації наслідків забруднення отруйними та легкозаймистими рідинами, також території з ризиком забруднення від зовнішнього впливу, що значно підвищує рівень екологічної безпеки об'єктів довкілля. Для задовільної роботи алгоритму запропоновано вважати територію поблизу резервуару такою, що вимагає постійного контролю за негативними впливами на об'єкти довкілля протягом всього терміну експлуатації резервуару.

Процес оцінки екологічної небезпеки РЗРВ, зокрема в зонах впливу техногенних землетрусів, може включати стеження за пошкодженнями споруд, проведення опитувань серед мешканців та інструментальні вимірювання для отримання даних. Зібрані дані потім аналізуються, щоб зробити висновки щодо стану екологічної небезпеки і визначити зони впливу землетрусів²⁸².

²⁸² Degtyariv K., Gnitko V., Kononenko Y., Kriutchenko D., Sierikova O., Strelnikova E. Fuzzy Methods for Modelling Earthquake Induced Sloshing in Rigid

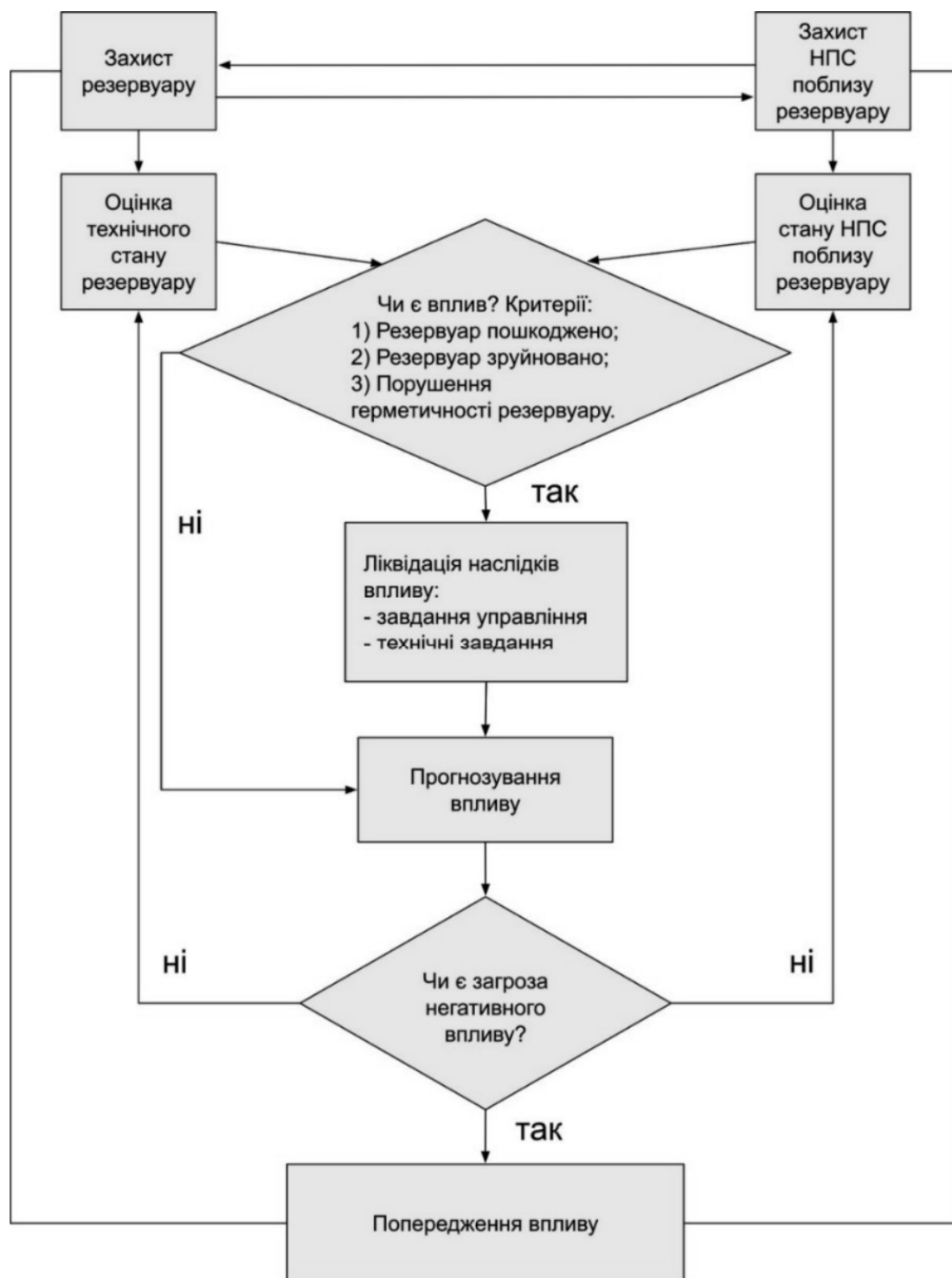


Рисунок 6.4 – Алгоритм дій при пошкодженні, руйнуванні та порушенні герметичності резервуарів для збереження отруйних та легкозаймистих рідин під дією техногенних та природних факторів

6.5. Проект комплексу заходів щодо забезпечення екологічної безпеки резервуарів зберігання рідких вуглеводнів

Проект комплексу заходів щодо забезпечення екологічної безпеки для резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях має на меті запобігання можливим негативним наслідкам, пов'язаним з витоками нафти або інших шкідливих речовин у навколишнє середовище. Резервуарні парки є ключовими об'єктами, де зберігається нафта або нафтопродукти, тому ефективне управління ризиками та забезпечення екологічної безпеки є надзвичайно важливими завданнями.

Основні складові проекту можуть включати:

1. Встановлення високотехнологічних систем моніторингу: Це можуть бути датчики, які постійно вимірюють рівень нафти в резервуарах, тиску, температури та інших факторів, що впливають на безпеку. Ці дані можуть надходити в реальному часі до централізованої системи керування, де оператори можуть відстежувати і реагувати на будь-які зміни або аномалії.

2. Розробка та впровадження надійних систем запобігання витоку: Це можуть бути системи перевірки нафтопроводів та засобів зберігання на присутність витоків, а також автоматичні механізми для блокування потоку нафти в разі виявлення проблем. Додатково, можуть використовуватись системи нейтралізації витіків, що включають в себе швидку реакцію на витік та його зупинку.

3. Впровадження навчальних програм і профілактичних заходів: Важлива частина забезпечення екологічної безпеки полягає у своєчасному навчанні персоналу, який працює в резервуарному парку. Це можуть бути навчання з питань безпеки, процедур реагування на аварійні ситуації, а також формування культури екологічного усвідомлення серед працівників.

4. Розробка екологічного плану надзвичайних ситуацій: Важливо мати готовість до надзвичайних ситуацій, таких як витік у водойму або екологічна аварія.

Пропонований авторкою проект комплексу заходів відноситься до попередження впливів РЗРВ на довкілля та є багатокomпонентною системою заходів та керівних принципів, передбачає необхідність врахування природних умов територій розташування РЗРВ, зокрема

обводнення ґрунтів, та впливів сейсмічних навантажень, ефективну співпрацю між органами державної влади, екологічними організаціями, підприємствами-власниками резервуарних парків та іншими зацікавленими сторонами. (Додаток Г).

6.7. Класифікація факторів впливу на умови експлуатації резервуарів із врахуванням природних і техногенних впливів

Типові пошкодження резервуарів під час землетрусів (Таблиці 6.1, 6.2) можна умовно поділити на два типи відповідно до двох рівнів розрахунку, закладених у нормативних документах (проектний землетрус, після якого передбачається продовження експлуатації та максимальний розрахунковий землетрус, при якому має забезпечуватися безпечне виведення з експлуатації).

Таблиця 6.1

Частота пошкоджень в залежності від обсягу резервуару

Пошкодження	Об'єм, м ³				
	1000 м ³	1000-5000 м ³	5000-10000 м ³	10000-50000 м ³	50000-100000 м ³
Перелив через верх	-	-	-	5	6
Пошкодження ПК	-	-	1	9	1
Пошкодження конічної кришки	-	2	3	1	-
Пошкодження верху цил. оболонки	-	1	4	4	-

Пошкодження частин ПК (сходинок, стійок рівнемірів)	-	-	3	7	12
Пружна втрата стійкості нижньої частини стінки	9	5	2	-	-
Розрив уторного вузла з розливом вмісту	5	1	2	10	-
Проковзування	1	1	-	-	-
Відрив анкерів	1	1	2	-	-
Перекидання	3	-	1	-	-
Нерівномірна осадка	3	11	1	3	-
Пошкодження штуцерів	14	-	-	-	-

Проаналізовано та класифіковано типові пошкодження резервуарів внаслідок землетрусів. Для підвищення сейсмостійкості резервуарів рекомендується розробка методики врахування факторів, що підсилюють сейсмічну небезпеку на територіях розміщення резервуарів зберігання рідких вуглеводнів.

Також рекомендується при проектуванні основ резервуарів проводити облік можливих порушень структури основи розрідження ґрунту, втрати стійкості укосів, значної неоднорідності кількості опадів, втрати несучої здатності чи розмиву ґрунтів, під дією додаткового живлення ґрунтових вод і підйому їх рівня від втрат із підземних комунікацій.

Таблиця 6.2

Типові пошкодження резервуарів

№	Тип	Опис	Причина	Характерність
А. Пошкодження, що ускладнюють експлуатацію та потребують ремонту (недопустимі або небажані на рівні ПЗ, можливі на рівні МРЗ)				
1	Втрата стійкості типу «слоняча нога»	У стінці розвивається двовісний напружений стан – розтягуючі напруження в кільцевому напрямку і стискаючі – в меридіональному. Радіальний зв'язок в місці з'єднання стінки з днищем перешкоджає радіальній деформації від дії тиску з внутрішньої сторони стінки, що призводить до виникнення згинального моменту в стінці. Даний вид пошкодження характеризується пружнопластичними деформаціями.	Різде збільшення стискаючих напружень в частині резервуара, не відчуває відриву. Дія згинального моменту, відрив частини днища від основи, нерівномірна осадка внаслідок порушень структури основи.	Всі типи циліндричних резервуарів з відношенням $H/D = 1-1,5$ при великих діаметрах
2	Ромбовидна форма втрати стійкості	Упруга втрата стійкості циліндричної оболонки.	Дія опрокидаючого моменту, відрив днища від основи, нерівномірна осадка	Всі типи циліндричних резервуарів з відношенням $H/D = 2$ при великих висотах

			внаслідок порушень структури основи.	
3	Зміщення резервуара	Проковзування незакріплених резервуарів зустрічається досить рідко і найчастіше не призводить до серйозних наслідків.	Горизонтальне сейсмічне вплив, що перевершує силу тертя днища об основу	Невеликі незакріплені резервуари
4	Пошкодження несучих конструкцій стаціонарних дахів	Втрата стійкості окремих несучих конструкцій дахів, втрата стійкості оболонки дахів від удару хвиль	Спільна дія навантажень від удару хвиль, інерційного руху рідини і вертикальних статичних навантажень.	Великі широкі резервуари зі стаціонарними дахами
5	Переливи, не викликають серйозних наслідків	Переливи від значних амплітуд хвиль на поверхні рідини при наявності зовнішнього корпусу/бар'єрів безпеки	Великі амплітуди хвиль на поверхні рідини при значних довгоперіодних сейсмічних впливах	Великі широкі резервуари

6	Пошкодження конструкцій вертикального сталевго резервуару з плаваючим дахом, підтоплення вертикального сталевго резервуару з плаваючим дахом	Пошкодження структурних елементів вертикального сталевго резервуару з плаваючим дахом - сходів, стійок рівнемірив і т.д.	Великі амплітуди хвиль на поверхні рідини при значних довгопериодних сейсмічних впливах	вертикальний сталевий резервуар з плаваючим дахом
7	Відрив і руйнування анкерних болтів, не приводять до розриву стінки	Вирир анкерних пристроїв з фундаменту внаслідок дії опрокидаючого моменту	Дія опрокидаючого моменту, відрив днища від основи, нерівномірна осадка внаслідок порушень структури основи.	Всі типи циліндричних резервуарів, закріплених з фундаментом (частіше зустрічається в вертикальному сталевому резервуарі з плаваючим дахом)
Б. Пошкодження, що викликають виведення з експлуатації або можуть призвести до катастрофічних наслідків (неприпустимі у будь-якому випадку)				

1	Розрив уторного вузла з розливом вмісту	Розрив шва призводить до витоку вмісту резервуара, а різниця тисків, що виникає через швидкий витік, також може призвести до пошкодження верхніх поясів і даху.	Такі пошкодження отримали кілька резервуарів під час Чилійського землетрусу в 1985 році. Під час відриву днища резервуара від основи в місці з'єднання стінки з днищем виникають розтягуючі напруження в зварному шві за рахунок деформування циліндра, що може призвести до розриву шва.	Всі типи циліндричних резервуарів
2	Розтріскування стінки	Розтягуючі кільцеві напруження можуть призвести до розтріскування стінки	Жорстке болтове/клепане з'єднання, не дозволяє знизити напруження за рахунок пластичності.	Відбувається лише в збірно-розбірних (на болтах) і клепаних резервуарах (більше не виробляються).

3	Руйнування трубопроводів	Руйнування трубопроводів, з'єднаних з резервуаром, як результат взаємних переміщень резервуара і опорних опор. Руйнування трубопроводів також веде до витоку вмісту.	Надмірна жорсткість трубопроводу між штуцером і найближчою опорною колоною.	Всі типи резервуарів з недостатньо гнучкими підвідними трубопроводами
4	Розрив стінки	Розрив стінки або днища резервуара в місцях прикріплення до них сходів і перехідних майданчиків; штуцерів трубопроводів і анкерних пристроїв.	Надмірна жорсткість з'єднання.	Закріплені резервуари з негнучким з'єднанням з фундаментом погано зарекомендували себе під час землетрусів. Невеликі закріплені резервуари, невеликі резервуари з недостатньо гнучкими підвідними трубопроводами
5	Переливи, які можуть призвести до серйозних наслідків	Переливи токсичних або криогенних продуктів, ЛВЖ від значних амплітуд хвиль на поверхні рідини при відсутності зовнішніх	Великі амплітуди хвиль на поверхні рідини при значних довгоперіодних сейсмічних впливах	Великі широкі резервуари

		стримуючих бар'єрів		
6	Пожежі	Загоряння і пожежі резервуарів з ЛВЖ	Виникнення іскри внаслідок тертя об стінку при вертикальних переміщеннях плаваючої кришки вертикального сталевго резервуару з плаваючим дахом	вертикальний сталевий резервуар з плаваючим дахом
7	Руйнування несучих опорних конструкцій	Руйнування колон сферичних резервуарів, руйнування опорних теплоізоляційних конструкцій і фундаменту вертикального ізотермічного резервуару	Втрата стійкості опорних стійок при позацентрово му стисненні, нерівномірна осадка кульового резервуару, кульового ізотермічного резервуару, вертикального ізотермічного резервуару повної герметизації	

Авторкою було класифіковано фактори впливу на умови експлуатації РЗРВ в штатному режимі та за наявності природних і техногенних впливів (Додаток Д), що враховують наступні фактори:

1. Матеріали: хімічний склад, тип, розміри і компоновка складових, початкове структурне пошкодження резервуара, анізотропія, будова і властивості резервуара, фізико-механічні властивості поверхні, об'ємні фізико-механічні властивості резервуара.

2. Конструкція: вид напруженого стану, геометрія поверхні, залишкові напруження, розміри, форма, тип, розміри і компоновка складових, глибина зміцненого шару, ступінь зміцнення.

3. Технологія виготовлення: ремонтні роботи, заміна обладнання.

4. Умови експлуатації: характер і рівень завантаженості, температура навколишнього середовища, вологість, опади, вітрове навантаження, снігове, режими експлуатації, впливи від природних явищ (землетруси, повені, урагани, ожеледь), техногенні впливи (техногенні землетруси, аварії, пошкодження резервуара).

5. Технічне обслуговування: регулярність оглядів, ремонтні роботи, заміна обладнання.

Важливо враховувати всі ці фактори при проектуванні, будівництві та експлуатації РЗРВ, щоб забезпечити їх стійкість.

Схема не є вичерпною і може бути доповнена іншими факторами, що впливають на стійкість РЗРВ. Важливість різних факторів може варіюватися залежно від конкретних умов.

Практичним застосуванням класифікації факторів впливу на умови експлуатації РЗРВ в штатному режимі та за наявності природних і техногенних впливів є можливість кращого розуміння факторів, що впливають на стійкість РЗРВ, можливість об'єктивніше оцінити ризики та розробляти заходи щодо підвищення стійкості РЗРВ, важливим також є навчання та інформування персоналу, який експлуатує РЗРВ.

6.8. Створення системи управління рівнем екологічної безпеки резервуарів зберігання рідких вуглеводнів

Розроблено науково-теоретичні основи створення схем управління рівнем екологічної безпеки резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях (Рисунок 6.6).

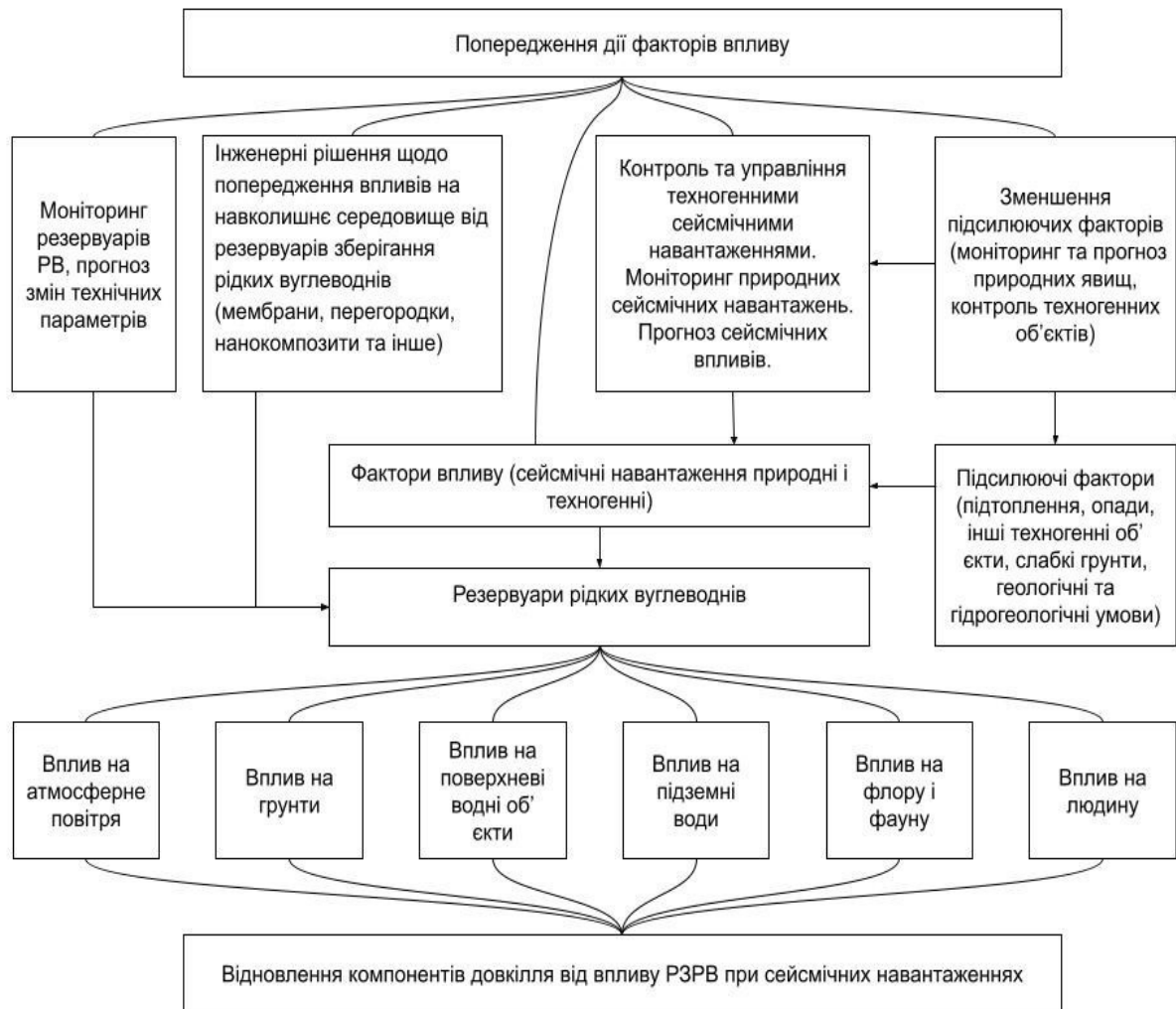


Рисунок 6.6 – Блок-схема підвищення рівня екологічної безпеки резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях

Блок-схема показує, що покращення стану екологічної безпеки резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях потребує комплексного підходу, який містить:

- застосування інженерних рішень для підвищення стійкості резервуарів до сейсмічних навантажень;
- контроль стану та управління процесом зберігання в резервуарах рідких вуглеводнів;
- моніторинг сейсмічних навантажень та факторів, що можуть їх підсилити;
- заходи щодо ліквідації наслідків аварій та відновлення довкілля.

Блок-схему можна використати для розроблення конкретних заходів щодо покращення стану екологічної безпеки резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях.

Розроблення схем управління у сфері екологічної безпеки резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях ґрунтується на наступних науково-теоретичних підходах²⁸³:

1. Системний підхід: розгляд резервуарів зберігання рідких вуглеводнів як складних систем, що взаємодіють з довкіллям, врахування всіх факторів, що впливають на екологічну безпеку РЗРВ при сейсмічних навантаженнях (внутрішні фактори: технічні характеристики резервуарів (матеріал, конструкція, розміри), фізико-хімічні властивості рідких вуглеводнів; зовнішні фактори: сейсмічні навантаження, інженерно-геологічні умови, кліматичні умови)

2. Теорія ризику: оцінка ризику аварій в РЗРВ при сейсмічних навантаженнях, визначення ймовірності та наслідків аварій, розроблення заходів щодо зниження ризику аварій.

3. Теорія управління: розроблення схем управління у сфері екологічної безпеки рідких вуглеводнів, використання методів математичного моделювання та прогнозування, застосування принципів автоматизованого контролю та управління.

4. Екологічна безпека: забезпечення мінімізації негативного впливу РЗРВ на довкілля, розроблення заходів щодо запобігання забруднення довкілля рідкими вуглеводнями, відновлення довкілля в разі аварій.

5. Сейсмостійкість: розроблення та впровадження сейсмостійких конструкцій РЗРВ, використання методів сейсмічного захисту резервуарів для рідких вуглеводнів.

6. Моніторинг: створення систем моніторингу технічного стану резервуарів для рідких вуглеводнів, контроль сейсмічної активності, прогнозування сейсмічних навантажень.

²⁸³ Khalmuradov B. D., Harbuz S. V., Ablieieva I. Y. Analysis of the technogenic load on the environment during forced ventilation of tanks. *Technology audit and production reserves*. 2018. № 1/3 (39). P. 45–52 [99]; Khalmuradov B., Harbuz S., Ablieieva I. Analysis of the technogenic load on the environment during Forced ventilation of tanks. *Technology audit and production reserves*. 2018. Vol. 1/3 (39). P. 45–52. URL: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.124341> [101].

7. Правове регулювання: розроблення та впровадження нормативних документів, що регламентують екологічну безпеку РЗРВ при сейсмічних навантаженнях. Врахування в будівельних нормативних документах вимог до проектування, будівництва та експлуатації резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при активізації сейсмічних подій на несейсмічних територіях, а також їх підсилюючих факторів, встановлення вимог до ліквідації наслідків аварій на РЗРВ від сейсмічних впливів різного походження. Дотримання вимог правового регулювання дозволяє підвищити стійкість резервуарів зберігання рідких вуглеводнів до сейсмічних навантажень та мінімізувати ризики виникнення аварійних ситуацій з впливом небезпечних речовин на навколишнє природне середовище.

Реалізація цих підходів дасть змогу покращити стан екологічної безпеки РЗРВ при сейсмічних навантаженнях, знизити ризик аварій резервуарів, запобігти забрудненню довкілля рідкими вуглеводнями, зменшити економічні та соціальні наслідки аварій резервуарів для зберігання рідких вуглеводнів.

Важливо зазначити, що розроблення схем управління у сфері екологічної безпеки резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях є складним завданням, яке потребує комплексного підходу та співпраці фахівців різних галузей.

Важливим є подальше вдосконалення методик оцінки ризику аварій резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях, методик прогнозування сейсмічних навантажень, розроблення типових схем управління рівнем екологічної безпеки резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях, розроблення та вдосконалення існуючих нормативних документів, що регламентують екологічну безпеку резервуарів рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях.

Впровадження цих науково-теоретичних основ та практичних заходів дасть змогу значно підвищити рівень екологічної безпеки зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях.

Система управління екологічною безпекою резервуарів зберігання рідких вуглеводнів (РВ) при сейсмічних навантаженнях – це комплекс заходів, спрямованих на попередження аварій резервуарів зберігання РВ при сейсмічних навантаженнях, ліквідацію наслідків аварій РЗРВ, відновлення довкілля в разі аварій РЗРВ.

Система управління екологічною безпекою резервуарів РВ при сейсмічних навантаженнях повинна включати:

1. Підсистему моніторингу: моніторинг технічного стану резервуарів зберігання РВ, моніторинг сейсмічної активності (природні та техногенні землетруси в сейсмічних та несейсмічних зонах), моніторинг стану довкілля на прилеглий до РЗРВ території.

2. Підсистему прогнозування: прогнозування сейсмічних навантажень, прогнозування ризику аварій РЗРВ.

3. Підсистему запобігання: забезпечення сейсмостійкості резервуарів зберігання РВ, розробка та впровадження заходів щодо зниження ризику аварій резервуарів РВ.

4. Підсистему ліквідації наслідків аварій: розробка плану ліквідації наслідків аварій резервуарів зберігання РВ, навчання персоналу діям у разі аварій РЗРВ, забезпечення ресурсів для ліквідації наслідків аварій резервуарів РВ.

5. Підсистему відновлення довкілля: розробка плану відновлення довкілля в разі аварій РЗРВ, проведення заходів щодо відновлення довкілля (рекультивація та ре медіація земель, відновлення видового складу рослин і тварин, відновлення водних об'єктів та інш.).

Впровадження системи управління екологічною безпекою резервуарів РВ при сейсмічних навантаженнях дозволить:

- Істотно підвищити рівень екологічної безпеки резервуарів зберігання РВ при сейсмічних навантаженнях.
- Знизити ризик аварій резервуарів зберігання РВ.
- Запобігти забрудненню довкілля рідкими вуглеводнями.
- Зменшити економічні та соціальні наслідки аварій резервуарів зберігання РВ.

Врахування природних та техногенних впливів на стан резервуара для вчасного попередження його руйнування і впливу рідких вуглеводнів на довкілля є важливим завданням (Рисунок 6.7).

До природних впливів на резервуари можна віднести блискавки, природні землетруси, вітер, зливу, торнадо, ураган, повінь, підтоплення тощо. У якості техногенних впливів слід враховувати мілітарні впливи, техногенні землетруси, будівництво, умови експлуатації резервуарів та інше. При руйнуванні резервуара і потраплянні РВ у довкілля необхідним є проведення заходів із ліквідації наслідків аварії. Якщо при дії природних або техногенних впливів резервуар не зруйнувався, то в ньому відбуваються інтенсивні плескання рідких вуглеводнів. Також може виникати статична електрика в резервуарі. Ці впливи, що є

наслідком природних і техногенних навантажень так само можуть призвести до руйнування резервуара, потрапляння рідких вуглеводнів у довкілля, до вибухів і пожеж. Моніторинг стану резервуара та моніторинг впливів на резервуар мають бути постійною частиною системи забезпечення екологічної безпеки процесу зберігання рідких вуглеводнів для врахування опосередкованої дії та віддаленої загрози впливів²⁸⁴.

²⁸⁴ Гавадзин Н. О. Природно-техногенні процеси та економічні збитки від шкідливих впливів нафтогазових підприємств на навколишнє середовище. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2010. № 1. С. 125–130 [285]; Максимюк М. Р., Міцкевич Д. І., Міцкевич А. І. Нафтове забруднення поверхневих вод та шляхи подолання його наслідків. Наукові праці Чорноморського державного університету імені Петра Могили комплексу «Києво-Могилянська академія». Сер.: Техногенна безпека. 2014. Т.233, Вип. 221. С. 37–40 [286]; Курганський В. М., Тішаєв І. В. До питання забруднення оточуючого середовища в процесі буріння нафтових та газових свердловин. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. 2006. № 38. С. 7–9 [287]; Іванюта С. Моніторинг та оцінювання екологічних ризиків техногенного походження. Аналітична доповідь Київ : Вид-во НІСД, 2012. 52 с. [288]; Рудько Г. І., Адаменко Я. О., Пилипенко А. А. та ін.. Оцінка впливів на навколишнє середовище (ОВНС) при експлуатації Новосхідницького нафтового родовища. Геоелекологічні проблеми Івано-Франківщини та Карпатського регіону: зб. наук. праць. Івано-Франківськ: ЕКОР. 1998. С. 149–196 [289]; Крайнюков О. М. Особливості розповсюдження вуглеводневого забруднення та оцінка його впливу на геоелекологічний стан басейну р. Сіверський Донець у межах Харківської області : автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 11.00.11 «Конструктивна географія і раціональне використання природних ресурсів». Харків, 2007. 20 с [290]. Іщук Ю. Л., Кобилянський Є. В., Кочірко Б. Ф. Біорозщеплюваність нафтопродуктів і проблеми біосфери. *Нафтова і газова промисловість*. 2004. № 1. С. 57–60 [291]; Гринюк В. І. Міграція нафтопродуктів в зоні впливу нафтогазовидобувних підприємств. Сучасний стан та якість навколишнього середовища окремих регіонів: зб. наук.праць Міжнародної наукової конференції молодих вчених. (Одеса, 1–3 червня 2016 р.). 2016. С. 85–88 [292]; Гринюк В. І. Техногенне навантаження нафтогазовидобувних підприємств на водне середовище. XVI Всеукраїнська наук.-техн. конф. (Одеса, 14 квітня 2016 р.). 2016. С. 22–24 [293]; Тимченко І. В. Дослідження моделей розповсюдження нафтових забруднень в умовах обмежених акваторій. *Електронний вісник НУК*. 2010. № 1 [294]; Ковач В. О. Аналіз надзвичайних ситуацій, пов'язаних із розливами нафти внаслідок аварій танкерів та інших суден. Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ ім Г.Є. Пухова НАН України. 2016. Вип. 77. С. 73–82 [295]; Ковач В. О. Розробка математичних засобів для оцінки рівня забруднення поверхні моря

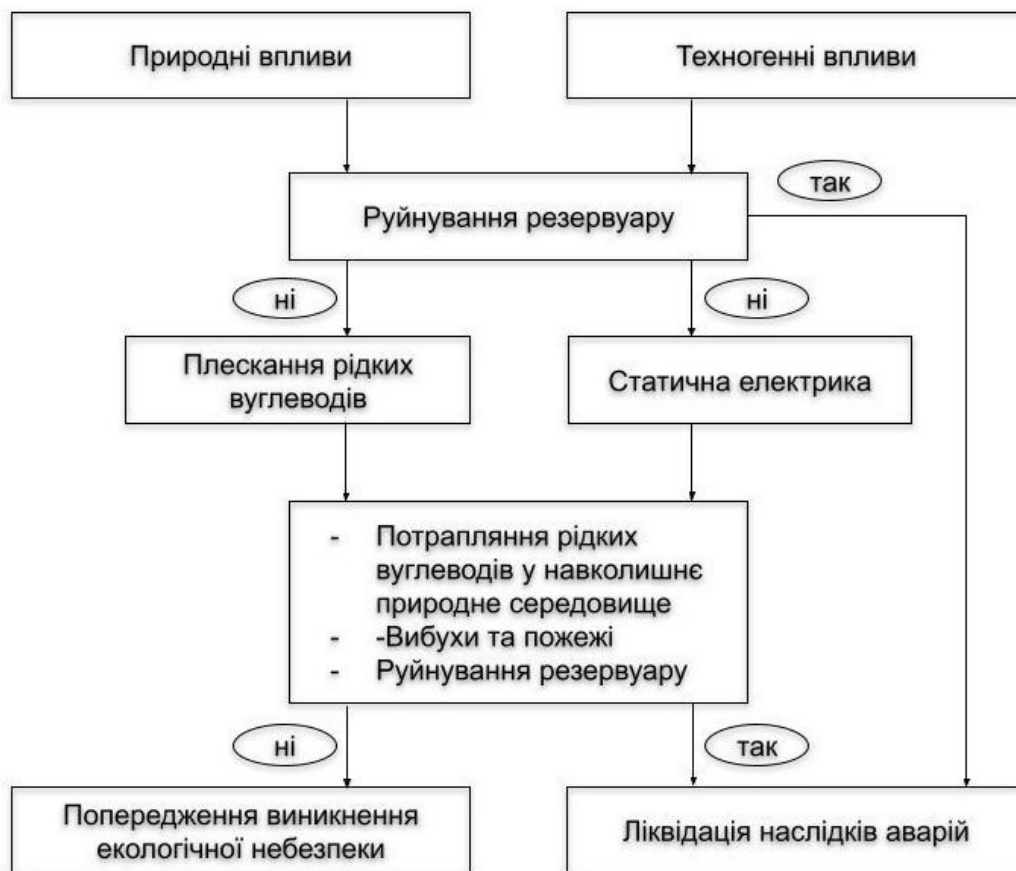


Рисунок 6.7 – Аналіз потенційних екологічних небезпек

в результаті розливу нафти: матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (Черкаси, 19–20 травня 2016 р.). Черкаси : ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2016. С. 63–65 [296]; Харламова О. В. Науково-методологічні основи управління екологічною безпекою в умовах природно-антропогенного навантаження : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 21.06.01. Суми, 2018. 38 с. [297]; Челядин Л. І., Григорчук Л. І., Челядин В. Л., Богославець М. М. Методи та устаткування зменшення забруднення водних ресурсів стоками з об'єктів нафтогазового комплексу. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2013. № 2(47). С. 145–151 [298]; Бондарець Ю. В., Матвеева О. Л. Аналіз технологій ліквідації нафторозливів із застосуванням сорбентів на основі торфового моху роду *Sphagnum*. *Проблеми екологічної біотехнології*. 2013. № 1. URL: <http://jrn1.nau.edu.ua/index.php/ecobiotech/article/view/4732> [299]; Назаренко С. К., Архипова Л. М. Сучасні методи ліквідації аварійних розливів нафти на водних об'єктах суходолу. *Науковий вісник ІваноФранківського національного технічного університету нафти і газу*. 2016. № 1. С. 72–79 [300].

6.9. Рекомендації щодо природоохоронних заходів на територіях розташування резервуарів

1. Заходи щодо запобігання аваріям:

а) антисейсмічний захист резервуарів зберігання рідких вуглеводнів, врахування ступені сейсмічності території розташування РЗРВ, використання сейсмостійких матеріалів, сейсмічна ізоляція, системи демпфування плескань рідини в РЗРВ.

б) система моніторингу: моніторинг технічного стану РЗРВ, моніторинг сейсмічної активності, моніторинг стану довкілля, моніторинг підсилюючих факторів сейсмічної небезпеки.

в) система раннього попередження: система прогнозування землетрусів, система оповіщення персоналу, система прогнозування підсилюючих факторів землетрусів.

2. Заходи щодо ліквідації наслідків аварій:

а) План ліквідації наслідків аварій: перелік дій, які необхідно виконати у разі аварії резервуара, відповідальність за виконання кожної дії, ресурси, необхідні для ліквідації наслідків аварії.

б) Навчання персоналу: навчання персоналу діям у разі аварії резервуара, тренування з ліквідації наслідків аварій.

3. Заходи щодо відновлення довкілля:

а) План відновлення довкілля: перелік заходів, які необхідно виконати для відновлення довкілля в разі аварії резервуара, відповідальність за виконання кожної дії, ресурси, необхідні для відновлення довкілля

б) Моніторинг довкілля: моніторинг стану довкілля після аварії резервуара, оцінка впливу аварії на довкілля.

4. Заходи щодо мінімізації впливу на довкілля:

а) Використання екологічно чистих технологій: використання резервуарів з подвійними стінками, використання систем уловлювання випарів РВ.

б) Очищення стічних вод: очищення стічних вод від РВ, очищення стічних вод від хімічних речовин.

в) Рекультивація земель: рекультивація земель, забруднених РВ, рекультивація земель, забруднених хімічними речовинами.

5. Заходи щодо підвищення екологічної свідомості:

а) Навчання персоналу: навчання персоналу екологічним нормам і правилам, навчання персоналу методам економного використання ресурсів.

б) Інформування громадськості: інформування громадськості про ризики, пов'язані з зберіганням РВ, інформування громадськості про заходи, які вживаються для захисту довкілля.

Розробка та впровадження природоохоронних заходів на територіях розташування резервуарів РВ при сейсмічних навантаженнях дозволить знизити ризик забруднення довкілля РВ, зменшити вплив на довкілля в разі аварії, підвищити рівень екологічної безпеки резервуарів зберігання рідких вуглеводнів.

За результатами дослідження розроблено і запропоновано для прийняття Верховною Радою України державної програми «Концепція щодо зниження техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів в умовах сейсмічних навантажень», яка визначає основні принципи державної політики в Україні щодо зниження техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів в умовах сейсмічних навантажень і напрям подальшого розвитку державної системи екологічної безпеки в Україні (Додаток А).

ВИСНОВКИ

У монографії наведено теоретичне узагальнення і нове вирішення наукової проблеми, яка полягає у розробленні теоретичних і прикладних засад підвищення рівня екологічної безпеки експлуатації резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях.

У результаті проведеного дослідження сформульовано низку концептуальних положень, висновків та пропозицій, спрямованих на досягнення поставленої мети, основними з яких є наступні:

1. Системно проаналізовано основні причини та наслідки техногенного впливу на довкілля від процесу зберігання рідких вуглеводнів в резервуарах при сейсмічних навантаженнях.

2. Розроблено модель впливу сейсміки на стійкість резервуарів, яка включає математичне моделювання параметрів землетрусів, а саме їх частот, магнітуд та відстані від резервуарів до епіцентру землетрусу, моделювання динамічних характеристик оболонкових конструкцій, моделювання впливу демпфуючих пристроїв на рівень підйому рідини в резервуарі, а саме впливу внутрішніх горизонтальних і вертикальних перегородок, а також плаваючої мембрани, які впливають на експлуатаційну надійність резервуару.

3. Розроблено модель впливу обводненості ґрунту на стійкість резервуара в умовах сейсмічної активності, яка враховує техногенні та природні фактори, що дозволить більш точно оцінювати та прогнозувати підвищення сейсмічної небезпеки у водонасичених ґрунтах в місцях розташування резервуарів зберігання рідких вуглеводнів.

4. Розроблено метод підвищення рівня екологічної безпеки експлуатації резервуарів шляхом прогнозування впливу техногенної сейсміки на стійкість резервуара при різних параметрах ґрунтів основи, різній формі резервуару та параметрах землетрусу, який дозволяє зменшити коливання рідини в резервуарі на 20-30 %, що дозволить безаварійно експлуатувати резервуари рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях магнітудою до 5 балів та знижувати техногенне навантаження на довкілля від впливу рідких вуглеводнів.

5. Розроблено метод підвищення рівня екологічної безпеки експлуатації резервуарів шляхом використання наноматеріалів в

каркасі резервуара на основі розробленої математичної моделі підвищення міцносних характеристик корпусу резервуару за рахунок використання нанокомпозитів, який дозволяє підвищувати сейсмостійкість резервуара на 7-18 % без зміни його геометричних параметрів, а також нейтралізувати статичні електричні заряди, які виникають в резервуарах за допомогою включень вуглецевих нановолокон.

6. Розроблено системний підхід до оцінки впливу на довкілля від техногенного навантаження процесу зберігання рідких вуглеводнів в резервуарах в умовах підвищення сейсміки, який включає інженерні та управлінські заходи зниження техногенного впливу від процесу зберігання рідких вуглеводнів на довкілля; Алгоритм дій при пошкодженні, руйнуванні та порушенні герметичності резервуарів для збереження отруйних та легкозаймистих рідин під дією техногенних та природних факторів, який, на відміну від інших, дозволяє враховувати окрім забруднених територій, що потребують ліквідації наслідків забруднення рідкими вуглеводніми, також території з ризиком забруднення при сейсмічних навантаженнях на резервуар; класифікацію факторів впливу на умови експлуатації резервуарів із врахуванням природних і техногенних впливів; Блок-схему підвищення рівня екологічної безпеки процесу зберігання рідких вуглеводнів в резервуарах при сейсмічних навантаженнях, яка дозволяє управляти факторами, що підсилюють сейсмічні навантаження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Yatsyshyn T., Polutrenko M., Poberezhny L., Maruschak P., Martynyuk R. Assessment of factors of technogenic and environmental risks at particular stages of the life cycle of oil and gaswells. *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 36. P. 362-369. URL: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.047>.
2. Tang L., Zhang M., Wen L. Support vector machine classification of seismic events in the Tianshan orogenic belt. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2020. 125. e2019JB018132. URL: <https://doi.org/10.1029/2019JB018132>.
3. Kendzera O. V., Mykulyak S. V., Semenova Yu. V., Skurativska I. A., Skurativskyi S. I. Assessment of seismic response of a soil layer with the oscillating inclusions. *Geophysical journal*. 2020. Vol. 42 (4). P. 47–58.
4. Kendzera O. V., Mykulyak S. V., Semenova Yu. V., Skurativska I. A., Skurativskyi S. I. Seismic response of a layered soil deposit with inclusions. *Geophysical journal*. 2021. Vol. 43 (2). P. 3–13.
5. Gryn D. M. Seismic hazard of the territory of Ukraine. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2023. Vol. (6). P. 25–33. URL: <https://doi.org/10.15407/visn2023.06.025>.
6. Кендзера О. В., Пигулевский П. Г., Андрущенко Ю. А. Особливості сейсмічності території Кривбасу. Доп. НАН України. 2021. № 6. С. 87–96. URL: <https://doi.org/10.15407/dopovidy.2021.06.087>.
7. Онищенко В. О., Винников Ю. Л., Зоценко М. Л., Харченко М. О., Ларцева І. І., Бредун В. І., Нестеренко Т. М. Ефективні конструктивно-технологічні рішення об'єктів зберігання нафти і нафтопродуктів у складних інженерно-геологічних умовах: монографія. Полтава: ФОП Пусан А. Ф. 2019. 233 с.
8. Гордієнко Ю. О., Каплаушенко В. М. Сучасні інформаційно-комп'ютерні технології та мережа сейсмічних спостережень ГЦСК щодо упередження максимального сейсмічного ефекту від землетрусу в ближній зоні. *Вісник ЖДТУ. Сер. «Технічні науки»*. 2017. № 3 (38). С. 61–71. URL: [https://doi.org/10.26642/tn-2006-3\(38\)-61-71](https://doi.org/10.26642/tn-2006-3(38)-61-71).
9. ДБН В.1.1-12:2014 Будівництво у сейсмічних районах України. Київ: Мінрегіонбуд України, 2014. 110 с. URL: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-1083#load>.
10. Щербина С. В., Пігулевський П. Г., Гурова І. Ю., Амашукелі Т. А., Шумлянська Л. О., Калініченко О. А., Калітова І. А., Малицький Д. В., Нікулін В. Г., Вербицький С. Т. Сейсмічні події і тектоніка Кривбасу. *Геофиз. журн*. 2021. Т. 43. № 6. С. 248–265. URL: <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i6.251566>.

11. Nahornyi V., Pigulevskiy P., Svystun V., Shumlianska L. To the question of verification of forecasting methods of earthquakes. *Extended Abstracts of XIV Int. Sci. Conf. «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment»*. (10–13 November 2020, Kyiv). 2020. P. 1–5. URL: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056080>.
12. Pihulevskiy P. G., Anisimova L. B., Kalinichenko O. O., Panteleeva N. B., Hanchuk O. V. Analysis of natural and technogenic factors on the seismicity of Kryvyi Rih. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1840(1), 012018. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1840/1/012018>.
13. Pihulevskiy P. H., Kendzera O. V., Babiy K. V., Anisimova L. B., Kyryliuk O. S. Connection of Kryvbas tectonics with natural and technogenic seismicity. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2023. Vol. (2), P. 5–10.
14. Li Y., Chen X., Chen L. The Earth's Rotation-Related Seismicity as a Precursor to the 2023 Mw 7.8 Gaziantep, Turkey Earthquake. *Preprints*. 2023. 2023080209. URL: <https://doi.org/10.20944/preprints202308.0209.v1>.
15. Sesetyan K., Stucchi M., Castelli V., Gomez Capera A. A. Kahramanmaras – Gaziantep Türkiye M7.7 Earthquake, 6 February 2023 (04:17 GMT+03:00). Large historical earthquakes of the earthquake-affected region: a preliminary report. *INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia*, Italy. 2023. Retrieved from URL: <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/en/>.
16. Yoshida N. Seismic Ground Response Analysis. *Dordrecht*: Springer. 2014. 365 p. URL: <https://doi.org/10.1007/978-94-017-9460-2>.
17. Salzano E., Iervolino I., Fabbrocino G. Seismic risk of atmospheric storage tanks in the framework of quantitative risk analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2003. Vol. 16, Is. 5. P. 403-409. URL: [https://doi.org/10.1016/S0950-4230\(03\)00052-4](https://doi.org/10.1016/S0950-4230(03)00052-4).
18. Dai Z., Qiao H., Hao X., Wang Y., Lei H., Cui Z. Influence of Heterogeneous Foundation on the Safety of Inverted Cone Bottom Oil Storage Tanks under Earthquakes. *Buildings*. 2023. Vol. 13. 1720. URL: <https://doi.org/10.3390/buildings13071720>.
19. Moein M.J.A., Langenbruch C., Schultz R. *et al.* The physical mechanisms of induced earthquakes. *Nat Rev Earth Environ*. 2023. Vol. 4. P. 847–863. URL: <https://doi.org/10.1038/s43017-023-00497-8>.
20. Зоценко М. Л., Винников Ю. Л., Харченко М. О., Ларцева І. І. Забезпечення надійної експлуатації нафтових резервуарів у складних геотехнічних умовах при сейсмічних впливах. *Проблеми та перспективи нафтогазової промисловості*. 2018. Вип. 2. С. 65-90. URL: <https://doi.org/10.32822/naftogazscience.2018.02.065>.

21. Zang Q., Liu J., Lu L., Lin G. A. NURBS-based isogeometric boundary element method for analysis of liquid sloshing in axisymmetric tanks with various porous baffles. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*. 2020. Vol. 81. P. 129-150.
22. Strelnikova E., Kriutchenko D., Gnitko V., Degtyarev K. Boundary element method in nonlinear sloshing analysis for shells of revolution under longitudinal excitations. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2020. Vol. 111. P. 78-87. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2019.10.008>.
23. Sierikova O., Strelnikova E., Gnitko V., Degtyarev K. Boundary Calculation Models for Elastic Properties Clarification of Three-dimensional Nanocomposites Based on the Combination of Finite and Boundary Element Methods. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2021. P. 351-356, DOI: 10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570086.
24. Gnitko V., Marchenko U., Naumenko V., Strelnikova E. Forced vibrations of tanks partially filled with the liquid under seismic load. *WIT Transaction on Modelling and Simulation*. 2011. Vol. 52. P. 285-296. URL: <https://doi.org/10.2495/BE110251>.
25. Sadek S. A., Gomaa M. S., El-Ghazaly H. A. Seismic Behavior of Ground Rested Rectangular RC Tank Considering Fluid- Structure- Soil Interaction. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 2019. Vol 16(1). P. 01-15. URL: <https://doi.org/10.9790/1684-1601010115>.
26. Kijko A., Vermeulen P. J, Smit A. Estimation Techniques for Seismic Recurrence Parameters for Incomplete Catalogues. *Surv Geophys*. 2022. Vol. 43. P. 597–617. URL: <https://doi.org/10.1007/s10712-021-09672-2>.
27. Payyappilly L., Reddy K. S., Karthik K., Somala S. N. Impact of directivity on seismic risk assessment: rupture distance, component and propagation length. *Asian Journal of Civil Engineering*. 2021. Vol. 22. URL: <https://doi.org/10.1007/s42107-021-00388-7>.
28. D'Amico M. Seismic fragility and dynamic behavior of atmospheric cylindrical steel tanks. [Dissertation thesis]. Alma Mater Studiorum Università di Bologna. Dottorato di ricerca in Ingegneria civile, chimica, ambientale e dei materiali, 30 Ciclo. 2018. URL: <https://doi.org/10.6092/unibo/amsdottorato/8660>.
29. Strelnikova E., Choudhary N., Kriutchenko D., Gnitko V., Tonkonozhenko A. Liquid vibrations in circular cylindrical tanks with and without baffles under horizontal and vertical excitations. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2020. Vol. 120. P. 13-27. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2020.07.02m>.
30. Choudhary N., Kumar N., Strelnikova E., Gnitko V., Kriutchenko D., Degtyariov K. Liquid vibrations in cylindrical tanks with flexible membranes.

Journal of King Saud University Science. 2021. Vol. 33 (8). 101589. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101589>.

31. Akkar S., Moghimi S., Arici Y. A study on major seismological and fault-site parameters affecting near-fault directivity ground-motion demands for strike-slip faulting for their possible inclusion in seismic design codes. *Soil Dyn Earthq Eng*. 2018. Vol. 104. P. 88–105.

32. Kramer S. L. *Geotechnical Earthquake Engineering*. New Jersey: Prentice Hall, Upper Saddle River. 1996. 672 p.

33. Zadeh L. A. Fuzzy sets. *Information and Control*. 1965. Vol.8. P. 338-353.

34. Andrić J., Lu D.-G. Seismic hazard analysis based on fuzzy-probabilistic approach. *6th ECCOMAS Thematic Conf. on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering* M. Papadrakakis, M. Fragiadakis (eds.), (Greece, 15–17 June, 2017). 2017. URL: <https://doi.org/10.7712/120117.5739.17539>.

35. Ahmadiani A., Salahgshour S., Chan C., Baleanu D. Numerical solution of fuzzy differential equations by an efficient Runge-Kutta method with generalized differentiability. *Fuzzy Set Syst*. 2018. Vol.331. P. 47-67.

36. Afsari N., Abdipour M., Fataneh T.-F. Seismic Hazard Analysis from Deterministic Method Using Fuzzy Logic in Anzali Port. *Earth Science Inform*. 2022. Vol. 15. URL: <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00742-y>.

37. Smetankina N., Kravchenko I., Merculov V., Ivchenko D., Malykhina A. Modelling of bird strike on an aircraft glazing. In: Nechyporuk, M., Pavlikov, V., Kritskiy, D. (eds) *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering. Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, Cham. 2020. Vol. 1113. P. 289–297. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-37618-5_25.

38. Yershov S., Rusanov A., Gardzilewicz A., Lampart P. Calculations of 3D viscous compressible turbomachinery flows. In: *Proc. 2nd Symp. on ComP. Technologies for Fluid/Thermal/Chemical Systems with Industrial Applications. ASME PVP Division Conf.* (Boston, 1-5 August 1999). PVP. 1999. Vol. 397(2). P. 143-154.

39. Wang Z. W., Ge N., Li C. W. Structural Vibration Mode Fuzzy Control Based on BPNeural Network Algorithm. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*. 2020. Vol 50. Is. 243(05). P. 17-23.

40. Foulger G. R., Wilson M. P., Gluyas J. G., Julian B. R., Davies R. J. Global review of human-induced earthquakes. *Earth Sci. Rev*. 2018. Vol. 178. P. 438–514.

41. Semmane F., Abacha I., Yelles-Chaouche A. K., Haned A., Beldjoudi H., Amrani A. The earthquake swarm of December 2007 in the Mila region of

northeastern Algeria. *Nat. Hazards*. 2012. Vol. 64. P. 1855-1871. URL: <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0338-7>.

42. Klose C. D. Coastal land loss and gain as potential earthquake trigger mechanism in SCRs. *Proceedings of the Fall Meeting of the American Geophysical Union abstract T51D-0759*. (San Francisco, 10–14 December, 2007). 2007.

43. González P. J., Tiampo K. F., Palano M., Cannavo F., Fernandez J. The 2011 Lorca earthquake slip distribution controlled by groundwater crustal unloading. *Nat. Geosci.* 2012. Vol. 5. P. 821-825. URL: <https://doi.org/10.1038/ngeo1610>.

44. Kundu B., Vissa N. K., Gahalaut V. K. Influence of anthropogenic groundwater unloading in Indo-Gangetic plains on the 25 April 2015 Mw 7.8 Gorkha, Nepal earthquake *Geophys. Res. Lett.* 2015. Vol. 42. P. 10607-10613.

45. Li T., Cai M. F., Cai M. A review of mining-induced seismicity in China. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 2007. Vol. 44. P. 1149-1171. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.06.002>.

46. Tang C., Wang J. W., Zhang J. Preliminary engineering application of microseismic monitoring technique to rockburst prediction in tunneling of Jinping II project. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* 2010. Vol. 3. P. 193-208.

47. Husen S., Kissling E., von Deschanden A. Induced seismicity during the construction of the Gotthard Base Tunnel, Switzerland: hypocenter locations and source dimensions. *J. Seismol.* 2012. Vol. 16. P. 195-213. URL: <https://doi.org/10.1007/s10950-011-9261-8>.

48. Ellsworth W. L. Injection-induced earthquakes. *Science*. 2013. Vol. 341. P. 142-149.

49. Darold A., Holland A. A., Chen C., Youngblood A. Preliminary analysis of seismicity near Eagleton 1–29, Carter County, July 2014 Oklahoma Geological Survey Open-file Report OF2-2014. 2014. 17 p.

50. Skoumal R. J., Brudzinski M. R., Currie B. S. Earthquakes induced by hydraulic fracturing in Poland township, Ohio *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2015. Vol. 105. P. 189-197.

51. Evans D. M. The Denver area earthquakes and the Rocky Mountain Arsenal disposal well. *Mt. Geol.* 1966. Vol. 3. P. 23-36.

52. Quigley M., Duffy B. Effects of Earthquakes on Flood Hazards: A Case Study From Christchurch, New Zealand. *Geosciences*. 2020. Vol. 10. 114 p. URL: <https://doi.org/10.3390/geosciences10030114>.

53. Brackley H. L. Review of Liquefaction Hazard Information in Eastern Canterbury, Including Christchurch City and Parts of Selwyn, Waimakariri and Hurunui Districts; GNS Science Consultancy Report 2012/218; Canterbury Regional Council: Canterbury, New Zealand. 2012. 99p.

54. Degtyariv K., Gnitko V., Kononenko Y., Kriutchenko D., Sierikova O., Strelnikova E. Fuzzy Methods for Modelling Earthquake Induced Sloshing in Rigid Reservoirs. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2022. P. 297-302. URL: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916466>.
55. Sierikova O., Strelnikova E., Degtyarev K. Seismic Loads Influence Treatment on the Liquid Hydrocarbon Storage Tanks Made of Nanocomposite Materials. *WSEAS Transactions on Applied and Theoretical Mechanics*. 2022. Vol. 17. P. 62-70. URL: <https://doi.org/10.37394/232011.2022.17.9>.
56. Cavalieri F., Franchin P., Giovinazzi S. Multi-hazard assessment of increased flooding hazard due to earthquake-induced damage to the natural drainage system. *Reliability Engineering & System Safety*. 2023. Vol. 237. 109348. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109348>.
57. Chmiel M., Godano M., Piantini M., Brigode P., Gimbert F., Bakker M., Courboux F., Ampuero J.-P., Rivet D., Sladen A., Ambrois D., Chapuis M. Brief communication: Seismological analysis of flood dynamics and hydrologically triggered earthquake swarms associated with Storm Alex. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2022. Vol. 22. is. 5. P. 1541–1558. URL: <https://doi.org/10.5194/nhess-22-1541-2022>.
58. ДБН В.1.2-14-2009 Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. Київ : Мінрегіонбуд України, 2017. 29 с.
59. ДБН В.2.1-10-2009 Основи та фундаменти будинків і споруд. Основні положення проектування (зі змінами №1 і №2). Київ : Мінрегіонбуд України, 2017. 82 с.
60. ДСТУ Б В.2.6-183:2011.Резервуари вертикальні циліндричні сталеві для нафти та нафтопродуктів. Загальні технічні умови. Київ : Укрндрпроектстальконструкція, 2012. 82 с.
61. Dong Z. Q., Li G., Song B., Lu G. H., Li H. N. Failure risk assessment method of masonry structures under earthquakes and flood scouring. *Mech. Adv. Mater. Struct.* 2022. Vol. 29. P. 3055–3066.
62. Sierikova O., Koloskov V., Strelnikova E. The groundwater level changing processes modeling in 2d and 3d formulation. *Acta Periodica Technologica*. 2022. Vol. 53. P. 36-47. URL: <https://doi.org/10.2298/APT2253036S>.
63. Серікова О. М., Стрельнікова О. О., Колосков В. Ю. Підвищення рівня екологічної безпеки забудованих територій України, схильних до підтоплення : монографія. Харків : НУЦЗ України, 2020. 142 с.

64. Serikova E. N., Yakovlev V. V. Additional infiltration to underground waters of big cities territory (on example Kharkiv region). In: Babaev V. N. (Ed.): *Proc.: Municipal Economy of Cities*. № 97, Kharkiv, KNAME. 2011. P. 344-348.
65. Sierikova E., Strelnikova E. Environmental safety of building development on the Kharkiv city flooding areas example. *Noble International Journal of Scientific Research*. 2019. Vol. 3(8). P. 72-78.
66. Serikova E., Strelnikova E., Yakovlev V. The Programme of Measures to Prevent Flooding on the Built-up Areas on Example of Kharkiv City. *International Journal of Development Research*. 2015. Vol. 5(12). P. 6236–6240.
67. Serikova E., Strelnikova E., Yakovlev V. Mathematical model of dangerous changing the groundwater level in Ukrainian industrial cities. *Journal of Environment Protection and Sustainable Development*. 2015. Vol. 1. № 2. P. 86-90.
68. Sierikova E. N., Strelnikova E. A. Mathematical Modeling of Groundwater Level Changing with Considering Evapotranspiration Factor. *International Journal of Modern Studies in Mechanical Engineering (IJMSME)*. Volume 6, Issue 1, ARC Publications, LLC, USA. 2020. P. 19–25. <http://dx.doi.org/10.20431/2454-9711.061003>.
69. Klute A. A numerical method for solving the flow equation for water in unsaturated materials. *Soil Science*. 1952. 73(2). P. 105-116.
70. Verma P. The laplace transform solution of a one dimensional groundwater recharge by spreading. *Annals of Geophysics*. 1969. 22(1). P. 25-31.
71. Ковальчук В. Особливості методології системного управління водним режимом територій для захисту від підтоплення. *Індуктивне моделювання складних систем*. 2014. Вип. 6. С. 97–106.
72. Ромащенко М. І. Савчук Д. П. Шляхи модернізації систем захисту територій від підтоплення в умовах зрошення. *Вісн. аграр. науки*. 2000. № 4. С. 59–64.
73. Ромащенко М. І., Савчук Д. П. Підтоплення земель в Україні. *Вісн. аграр. науки*. 2001. № 8. С. 54–59.
74. Гранько О. В. Напружено-деформований стан тривало навантажених лесових основ за умови їх підтоплення : автореф. дис. канд. техн. наук. Полтав. нац. техн. ун-т ім. Ю.Кондратюка. Полтава, 2008. 20 с.
75. Бабіченко В. Я. Нагальні проблеми ліквідації підтоплення ґрунтовими водами територій міст і селищ міського типу України. Матеріали доп. і повідомл. міжнар. конф. (14-16 жовт. 1998 р., м. Харків. 1998). Харків. 1998. Ч. 1. С. 106.
76. Биченок М. М., Іванюта С. П., Яковлев Є. О. Про вплив екзогенних геологічних процесів на рівень техногенних ризиків

життєдіяльності. Збірник наукових праць Українського державного геологорозвідувального інституту. 2006. №1. С. 85–91.

77. Волошкіна О. С., Березницька Ю. О., Яковлев Є. О. Дослідження рівнів впливу регіонального підтоплення на якість поверхневих водних ресурсів. *Екологічна безпека та природокористування*. 2008. № 1. С. 61–70.

78. Вижва С., Цюпа І. Динаміка процесів підтоплення центральної частини національного комплексу «Експоцентр України» за даними геофізичних досліджень. *Вісник Київського національного університету ім. Т. Г. Шевченка*. 2010. № 49. С. 32–35.

79. Кошляков О. Є., Диняк О. В. Досвід застосування геоінформаційних технологій для вивчення процесу підтоплення територій долин малих річок м. Києва. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльн.* 2007. № 1. С. 25–29.

80. Сай В. М. Дослідження процесу підтоплення земель з врахуванням соціально-економічних збитків. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*. 2011. № 75. С. 127–132.

81. Менейлюк А. І., Петровський А. Ф., Борисов О. О., Кирилюк С. В. Влаштування протифільтраційного екрана для захисту підземного простору від підтоплення. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. 2018. Т.29 (68) Ч. 3. № 1. С. 176–180.

82. Кремез В. С., Буц Ю. В., Цимбал В. А. Моделювання процесу підтоплення територій в зоні впливу водосховищ. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2012. № 1–2. С. 128–130.

83. Лущик А. В., Шwirло М. І., Лущик А. А., Парак Т. Ю. Основні положення щодо удосконалення системи моніторингу при підтопленні територій. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2003. № 6. С. 33–37.

84. Лущик А. В., Шwirло М. І., Яковлев Є. О. Основні зміни інженерно-геологічних умов у межах підтоплених територій та напрями їх довивчення. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2003. № 6. С. 28–32.

85. Разметаєв С. В., Чебанов О. Ю. Про стратегію та головні завдання вирішення проблеми підтоплення населених територій в Україні. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2003. № 6. С. 5–11.

86. Голуб В. П. Умови та фактори техногенного підтоплення. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. 2005. № 1. С. 29–32.

87. Барщевський М. Є., Гриневецький В. Т., Сорокіна Л. Ю. Підтоплення земель в Україні: проблема та шляхи її подолання. *Укр. геогр. журн.* 2003. № 2. С. 3–8.

88. Абрамов І. Б. Формування підземних вод промислово-міських агломерацій (науково-методичні аспекти екологічної безпеки): Автореф. дис. д-ра техн. наук. Нац. акад. природоохорон. та курорт. буд-ва. Сімферополь, 2007. 36 с.
89. Телима С. В. Дослідження розвитку процесів підтоплення в період 1980–2004 років. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. 2006. Вип. 7. С. 127–140.
90. Серікова О. М. Прогнозування і управління рівнем ґрунтових вод для підвищення екологічної безпеки забудованих територій України : дис. ... канд. техн. наук: 21.06.01. Харків : Харківський нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, 2019. 166 с.
91. Prasad K. H. Sensitivity to unsaturated soil properties. *Sadhana, Indian Academy of Sciences*. 2019. Vol. 26(6). P. 517-528.
92. Desai N. B. The study of problems arises in single phase and multiphase flow through porous media. Ph.D. Thesis, South Gujarat University, Surat, India. 2002.
93. Joshi M. S., Desai N. B., Mehta M. N. One dimensional and unsaturated fluid flow through porous media. *Int. J. Appl. Math. and Mech.* 2010. Vol. 6(18). P. 66–79.
94. Shah K., Kunjan T. Solution of Burger's Equation in a One-Dimensional Groundwater Recharge by Spreading Using q-Homotopy Analysis Method. *Eur. J. Pure Appl. Math.* 2016. Vol. 9, № 1. P. 114–124.
95. Nasser M., Daneshbod Y., Pirouz M. D., Rakhshandehroo G. R., Shirzad A. New analytical solution to water content simulation in porous media. *J. Irrig. Drain. Eng.* 2012. Vol. 138(4). P. 328–335.
96. Koohestani N., Halaghi M. M., Dehghani A. A. Numerical Simulation of Groundwater Level Using MODFLOW Software (A Case Study: Narmab Watershed, Golestan Province). *IJABIS*. 2013. Vol. 1(8). P. 858–873.
97. ДБН В.1.1-45:2017 Будівлі і споруди в складних інженерно-геологічних умовах. Загальні положення. Київ : Мінрегіонбуд України, 2017. 39 с.
98. Khan A. A. The geo-genetic status of earthquake-related hazards and the role of human and policy dimensions in impact mitigation. *Environmental Hazards*. 2018. Vol. 17(4). P. 276-291. URL: <https://doi.org/10.1080/17477891.2018.1498763>.
99. Khalmuradov B. D., Harbuz S. V., Ablieieva I. Y. Analysis of the technogenic load on the environment during forced ventilation of tanks. *Technology audit and production reserves*. 2018. № 1/3 (39). P. 45–52.
100. Гарбуз С. В. Системний підхід до зниження екологічної небезпеки вентиляції резервуарів з нафтопродуктами. *Вісник Нац. техн. ун-*

ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Сер.: *Механіко-технологічні системи та комплекси*. Харків: НТУ «ХПІ», 2016. № 7 (1179). С. 106–118.

101. Khalmuradov B., Harbuz S., Ablieieva I. Analysis of the technogenic load on the environment during Forced ventilation of tanks. *Technology audit and production reserves*. 2018. Vol. 1/3 (39). P. 45–52. URL: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.124341>.

102. Олійник В. В., Гончаренко Я. О. Втрати нафтопродуктів при випарі їх в навколишнє середовище з резервуарів зі стаціонарною покрівлю. Матеріали VII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю. Черкаси : ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. (Черкаси, 20–21 жовтня 2017 р.). 2017. С. 169–171.

103. Адаменко М. І., Гарбуз С. В. Інформаційна модель розповсюдження забруднення атмосфери викидами із резервуарів з залишками нафтопродуктів під час їх провітрювання. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Сер.: Механіко-технологічні системи та комплекси*. Харків: НТУ «ХПІ». 2016. № 17 (1189). С. 115–121.

104. Sierikova O., Strelnikova E., Kriutchenko D. Membrane installation in storage tanks for seismic loads impact protection. *Acta Periodica Technologica*. 2023. Vol. (54). P. 209–222. URL: <https://doi.org/10.2298/APT2354209S>.

105. Stofan A.J.; Sumner I.E. *Technical Note*; Natl. Aeronaut. SP. Adm. Ohio, Lewis Res. Center: Cleveland, OH, USA. 1963.

106. Chiba M. Nonlinear hydroelastic vibration of a cylindrical tank with an elastic bottom, containing liquid. Part I: Experiment. *J. Fluids Struct.* 1992. Vol. 6. P.181–206.

107. Yalla S.K., Kareem A., Kantor J.C. Semi-active tuned liquid column dampers for vibration control of structures. *Eng. Struct.* 2001. Vol. 23. P. 1469–1479.

108. Bredmose H., Brocchini M., Peregrine, D.H., Thais L. Experimental investigation and numerical modelling of steep forced water waves. *J. Fluid Mech.* 2003. Vol. 490. P. 217–249.

109. Akyildiz H., Ünal E. Experimental investigation of pressure distribution on a rectangular tank due to the liquid sloshing. *Ocean Eng.* 2005. Vol. 32. P. 1503–1516.

110. Idelsohn S.R., Marti J., Souto-iglesias A., Oñate E. Interaction between an elastic structure and free-surface flows: Experimental versus numerical comparisons using the PFEM. *Comput. Mech.* 2008. Vol. 43. P. 125–132.

111. Pal P. Sloshing of Liquid in Partially Filled Container—An Experimental Study. *Int. J. Recent Trends Eng.* 2009. Vol. 1. P. 1–5.

112. Michael Isaacson B., Ryu C.-S. Earthquake-Induced Sloshing in Vertical Container of Arbitrary Section. *J. Eng. Mech.* 1998. Vol. 124. P. 158–166.
113. Hernández-Barrios H., Heredia-Zavoni E., Aldama-Rodríguez Á.A. Nonlinear sloshing response of cylindrical tanks subjected to earthquake ground motion. *Eng. Struct.* 2007. Vol. 29. P. 3364–3376.
114. Panigrahy P. K., Saha U. K., Maity D. Experimental studies on sloshing behavior due to horizontal movement of liquids in baffled tanks. *Ocean Eng.* 2009. Vol. 36. P. 213–222.
115. Luo H., Zhang R., Weng D. Mitigation of liquid sloshing in storage tanks by using a hybrid control method. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 2016. Vol. 90. P. 183–195.
116. Hashimoto H., Hata Y., Kawamura K. Estimation of oil overflow due to sloshing from oil storage tanks subjected to a possible Nankai Trough earthquake in Osaka bay area. *J. Loss Prev. Process Ind.* 2017. Vol. 50. P. 337–346.
117. Kim Y. Numerical simulation of sloshing flows with impact load. *Appl. Ocean Res.* 2001. Vol. 23. P. 53–62.
118. Celebi M. S., Akyildiz H. Nonlinear modeling of liquid sloshing in a moving rectangular tank. *Ocean Eng.* 2002. Vol. 29. P. 1527–1553.
119. Chen Y., Xue M. A. Numerical simulation of liquid sloshing with different filling levels using OpenFOAM and experimental validation. *Water* 2018. Vol. 10. P. 1752.
120. Cheng X., Cao L., Zhu H. Liquid-solid Interaction Seismic Response of an Isolated Overground Rectangular Reinforced-concrete Liquid-storage Structure. *J. Asian Archit. Build. Eng.* 2015. Vol. 14. P. 175–180.
121. Yu C.-C., Whittaker A., Coleman J. Verification of a fluid-structure-interaction model for seismic analysis of Gen IV nuclear power plants. In *Proceedings of the 11th National Conference in Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute.* (Los Angeles, CA, USA. 25–29 June 2018). 2018.
122. Waezi Z., Attari N.K.A., Rofooei F. R. Controlling the seismic response of structures under near-field earthquakes with fluid/structure interaction of cylindrical liquid tanks. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 2019. Vol. 23. P. 1–24.
123. Dinçer A. E. Investigation of the Sloshing Behavior Due to Seismic Excitations Considering Two-Way Coupling of the Fluid and the Structure. *Water* 2019. Vol. 11. P. 2664. URL: <https://doi.org/10.3390/w11122664>.
124. Lukianchenko O. O., Bouraou N. I., Kostina O. V., Kuzko O. V. Investigation of Static and Dynamic Characteristics of Complex Thin-Walled Shell Structure with Cracks. *Strength of Materials.* 2016. Vol. 48. Is. 3. P. 401–410.

125. Rabinovich S. G. Measurement errors and uncertainties theory and practice. Third edition. Springer Science and Media, Inc. USA. 2005. 308 p.
126. Bouraou N. I., Lukianchenko O., Tsybulnik S., Shevchuk D. Vibration condition monitoring of the vertical steel tanks. *Vibration in Physical Systems*. 2016. Vol. 27. P. 55-60.
127. Bouraou N., Rupich S., Lukianchenko O., Kostina O. Monitoring of the Crack Propagation in Welded Joint of the Tank Using Multi-Class Recognition. *Vibrations in Physical Systems*. 2018. Vol. 29. P. 8.
128. Sierikova O., Strelnikova E., Degtyarev K. Strength Characteristics of Liquid Storage Tanks with Nanocomposites as Reservoir Materials. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2022. P. 151-157. URL: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916369>.
129. Ewald V., Ochôa P., Groves R., Boller C. Design of a structural health monitoring system for a damage tolerance fuselage component. *Proceedings of the 7th International Symposium on NDT in Aerospace*. 2015. P. 17–19.
130. Amir Siddiq M. Deformation and failure in nanomaterials via a data driven modelling approach. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*. 2020. Vol. 10. Is. 4. P. 249–252.
131. Vambol S., Vambol V., Suchikova Y., Deyneko N. Analysis of the ways to provide ecological safety for the products of nanotechnologies throughout their life cycle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 1. № 10–85. P. 27–36.
132. Ibrahim R. A., Pilipchuck N., Ikeda T. Recent Advances In Liquid Sloshing Dynamics. *Applied Mechanics Reviews*. 2001. Vol. 54. № 2. P. 133–199. URL: <https://doi.org/10.1115/1.3097293>.
133. Ibrahim R. A. Liquid Sloshing Dynamics. Cambridge University Press, New York. 2005.
134. Ventsel E., Naumenko V., Strelnikova E., Yeseleva E. Free vibrations of shells of revolution filled with a fluid. Engineering analysis with boundary elements. 2010. Vol. 34. P. 856–862. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2010.05.004>.
135. Серікова О. М., Вплив резервуарів для збереження отруйних та легкозаймистих рідин на навколишнє середовище. Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали та програма VII Всеукраїнської науково-технічної конференції (м. Суми, 21–24 квітня 2020 р.). 2020. С. 238-239.
136. Кендзера А. О., Семенова А. Ю. Моделювання впливу ґрунтової товщі на параметри сейсмічної небезпеки. *Світ геотехніки*. 2017. № 3 (55). С. 4–14.

137. Старостенко В., Кендзера О., Сафронов О. Основні напрямки розвитку геофізичних досліджень у галузі оцінки сейсмічної небезпеки території України. *Вісник Київського національного ун-ту ім. Тараса Шевченка: Геологія*. 2011. № 52.
138. Кендзера А. О., Семенова А. Ю. Моделювання впливу ґрунтової товщі на параметри сейсмічної небезпеки. *Світ геотехніки*. 2017. № 3 (55). С. 4–14.
139. Шимановський О., Адріанов В., Волков І., Гордєєв В., Гром А., Собко А. ДСТУ Б В.2.6-183:2011 «Резервуари вертикальні циліндричні сталеві для нафти та нафтопродуктів. Загальні технічні умови (ГОСТ 31385-2008, NEQ)». *Мінрегіон України*. 2012. 81 с.
140. Шевчик Л. З., Романюк О. І. Використання обліпихи крушиновидної для фітореMediaції нафтозабруднених ґрунтів. *Biological Bulletin of Bogdan Chmelnytsky Melitopol State Pedagogical University*. 2016. Vol. 6(3). P. 472–480.
141. Шевчик-Костюк Л. З., Романюк О. І., Ощиповський І. В. (2022). Особливості забруднення ґрунтів нафтою та нафтопродуктами: огляд. *Acta Biologica Ukrainica*. 2022. (1). С. 32-40. URL: <https://doi.org/10.26661/2410-0943-2022-1-04>.
142. Шевчик Л., Джура Н., Романюк О., Цвілинюк О., Терек О. Вплив абіотичних факторів на випаровування нафти з ґрунту. *Молодь і поступ біології: збірник тез VIII міжнар. конф. студентів та аспірантів* (Львів, 3-6 квітня 2012 р.). 2012. С. 182–183.
143. Шевчик Л., Романюк О. Дослідження деяких закономірностей впливу нафти на початкові ростові параметри рослинних тест-об'єктів. *Вісник Львівського університету. Серія біологічна*. 2014. 67. С. 129–137.
144. Шевчик Л. З., Джура Н. М., Романюк О. І. Терек О. І. Вплив абіотичних факторів і фітореMediaнтів на біодеградацію нафти у ґрунті. *Захист навколишнього середовища. Збалансоване природокористування: Матер. третьої міжнар. студ. наук.-практ. конф.* (Львів, 16-17 листопада 2010 р.). 2010. С. 60-62.
145. Янченко І. О., Аблєєва І. Ю. Забруднення підземних вод під час освоєння родовищ нафтогазовидобувного комплексу. Сучасні технології у промисловому виробництві: матер. VII Всеукр. наук.-техн. конф. (Суми, 21–24 квітня 2020 р.). Суми : Сумський державний університет, 2020. С. 159–160.
146. Dadashov I., Loboichenko V., Kireev A. Analysis of the ecological characteristics of environment friendly fire fighting chemicals used in extinguishing oil products. *Pollution Research*. 2018. Vol. 37 (1). P. 63–77.

147. Абрамов Ю. О., Басманов О. Є., Олійник В. В. Пат. UA 152609 У, Україна, МПК B65D 88/34 (2006.01). Резервуар для нафтопродуктів/патентовласник: Національний університет цивільного захисту України. № u202202966; заяв. 16.08.2022; опубл. 23.03.2023, бюл. № 12.
148. Абрамов Ю. О., Байтала М. Р. Математична модель пожежі нафтопродукту на залізничному транспорті. *Пожежна безпека: теорія і практика*. 2009. № 4. С. 10–13.
149. Дубицький А. Ю., Чепкий Л. П., Семенов І. О. Характеристика аварій на хімічно-небезпечних об'єктах. *Современные проблемы токсикологии*. 1999. №2. С. 14–17.
150. Липовий В. О., Удянський М. М. Техногенні ризики забруднення довкілля під час експлуатування та ремонтних робіт резервуарів з нафтопродуктами. Харків : НУГЗУ. 2017. 107 с.
151. Medvedovskaya T., Strelnikova E., Medvedyeva K. Free hydroelastic vibrations of hydroturbine head covers. *Int. J. Eng. and Advanced Research Technology*. 2015. Vol. 1. № 1. P. 45–50.
152. Серікова О. М., Стрельнікова О. О., Крютченко Д. В. Оцінка сили сейсмічних навантажень на резервуари для збереження отруйних та легкозаймистих рідин. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*. 2021. Вип. 51. С. 70-80. URL: <https://doi.org/10.26565/2304-6201-2021-51-08>.
153. Gnitko V., Degtyariev K., Karaiev A., Strelnikova E., Multi-domain boundary element method for axisymmetric problems in potential theory and linear isotropic elasticity, *WIT Transactions on Engineering Sciences*. WIT Press. 2019. P. 13–25. URL: <https://doi.org/10.2495/BE410021>.
154. Strelnikova E., Kriutchenko D., Gnitko V., Degtyarev K. Boundary element method in nonlinear sloshing analysis for shells of revolution under longitudinal excitations. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2020. Vol. 111. P. 78-87. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2019.10.008>.
155. Degtyariev K., Gnitko V., Kononenko Y., Kriutchenko D., Sierikova O., Strelnikova E. Fuzzy Methods for Modelling Earthquake Induced Sloshing in Rigid Reservoirs. *2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2022. P. 297-302. URL: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek57572.2022.9916466>.
156. Gnitko V., Degtyariev K., Naumenko V., Strelnikova E. BEM and FEM analysis of the fluidstructure interaction in tanks with baffles, *Int. Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. 2017. Vol. 5 (3). P. 317–328. URL: <https://doi.org/10.2495/CMEM-V5-N3-317-328>.

157. Zheng Jh., Xue M. A., Dou P., et al. A review on liquid sloshing hydrodynamics. *J Hydrodyn.* 2021. Vol. 33. P. 1089–1104. URL: <https://doi.org/10.1007/s42241-022-01111-7>.
158. Raynovskyy I. A., Timokha A. N. Sloshing in Upright Circular Containers: Theory, Analytical Solutions, and Applications. CRC Press/Taylor & Francis Group. 2020. 170 p.
159. Nahornyi V. V., Shevchenko A. V., Lyashchuk V. I., et al. Hydrogeodeformation monitoring as a tool for earthquake prediction in the Dnieper-Krivoy Rog aulacogen. *Journal of Geodynamics.* 2020. Vol. 136. P. 101718.
160. Венгерський П. С. Чисельне моделювання руху поверхневих і ґрунтових потоків та їх взаємодія на території водозбору : автореф. дис. ... д-ра фіз.-мат. наук : 01.05.02. Львів, 2017.
161. Li Y., Zhang G., Wang H., et al. Monitoring of groundwater level changes and its relationship with tectonic activities in the North China Plain. *Engineering Geology.* 2023. Vol. 282. P. 106135.
162. Jing H., Chen H., Yang J., Li P. Shaking table tests on a small-scale steel cylindrical silo model in different filling conditions. *Structures.* 2022. Vol. 37. P. 698–708.
163. Mansour S., Pieraccini L., Palermo M., Foti D., Gasparini G., Trombetti T., Silvestri S. Comprehensive Review on the Dynamic and Seismic Behavior of Flat-Bottom Cylindrical Silos Filled with Granular Material. *Front. Built Environ.* 2022. 7. 805014.
164. Про затвердження Правил пожежної безпеки в Україні НАКАЗ МВС України № 1417 від 30.12.2014 (редакція від 03.10.2017 р.) URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0252-15/paran19>.
165. ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги», затверджений наказом Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 04.11.2016 № 297.
166. ВБН В.2.2-58.1-94 Проектування складів нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа. Зі Зміною № 1 (затвердженою наказом Держнафтогазпрому України від 24.12.1999 № 136а).
167. Soriano C., Tarazona S. F., Almeida M.C.F., Almeida M.S.S., Borges R. G. Selection of earthquake ground motion accelerograms for the continental margin of Southeastern Brazil. *DYNA.* 2021. Vol. 88 (217). P. 228-236.
168. Ravnik J., Strelnikova E., Gnitko V., Degtyarev K., Ogorodnyk U. BEM and FEM analysis of fluid–structure interaction in a double tank. *Engineering Analysis with Boundary Elements.* 2016. Vol. 67. P. 13-25. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2016.02.006>.

169. Sivanandam S. N., Sumathi S., Deepa S. N. Introduction to Fuzzy Logic Using MATLAB, Springer, Berlin Heidelberg. 2007.
170. Avramov K.V. Nonlinear modes of parametric vibrations and their applications to beams dynamics, *Journal of Sound and Vibration*. 2009. Vol. 322. P. 476–489. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.07.013>.
171. Vambol S., Vambol V., Suchikova Y., Deyneko N. Analysis of the ways to provide ecological safety for the products of nanotechnologies throughout their life cycle. *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 1/10(85) (2017) P. 27-36. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.85847>.
172. Свиридов В. А., Присяжнюк В. В., Кухарішин С. Д., Якіменко М. Л. Деякі проблемні питання системи протипожежного захисту нафтопереробних підприємств. URL: <http://www.undicz.mns.gov.ua/news/162.html>.
173. Бабенко Ю. В., Дудченко В. Г., Басаєв А. М., Савельєв І. В., Деревинський Д. М., Боровиков В. О., Антонов А. В. Протипожежний захист складів нафти і нафтопродуктів. *Оглядова інформація : УкрНДІПБ*, 2002. 142 с.
174. Stevens C. J., Bell J.N.B., Brimblecombe P., Clark C. M., Dise N. B., Fowler D., Lovett G. M., Wolseley P. A. The impact of air pollution on terrestrial managed and natural vegetation: Air pollution impacts on vegetation. *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 2020. Vol. 378. 20190317.
175. Wu D., Chen Z. Quantitative risk assessment of fire accidents of large-scale oil tanks triggered by lightning. *EFA*. 2016. Vol. 63. P. 172–181.
176. Xie S., Dong S., Chen Y., Peng Y., Li X. A novel risk evaluation method for fire and explosion accidents in oil depots using bow-tie analysis and risk matrix analysis method based on cloud model theory. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2021. Vol. 215. 107791.
177. Pouyakian M., Jafari M. J., Laal F., Nourai F., Zarei E. A comprehensive approach to analyze the risk of floating roof storage tanks. *Process Saf. Environ. Prot.* 2021, 146, 811–836.
178. Zinke R., Melnychuk J., Köhler F., Krause U. Quantitative risk assessment of emissions from external floating roof tanks during normal operation and in case of damages using Bayesian Networks. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 2020. № 197. S. 2–12.
179. Bouafia A.; Bougofa M.; Rouainia M.; Medjram M.S. Safety Risk Analysis and Accidents Modeling of a Major Gasoline Release in Petrochemical Plant. *J. Fail Anal. Prev.* 2020. Vol. 20. P. 358–369.

180. Бредун В. І. Управління екологічною безпекою сейсмотехнонавантаженого регіону : дис. ... канд. техн. наук: 21.06.01. Кременчук : Крем. Нац. ун-т. ім. Михайла Остроградського, 2011. 191 с.
181. Люта, Н., Петрочко, В. Визначення максимального рівня заповнення вертикального резервуара з врахуванням дії сейсмічних навантажень. *Збірник наукових праць ЛОГОΣ*. 2020. Р. 46–48. URL: <https://doi.org/10.36074/11.12.2020.v2.13>.
182. Ковалишин В. В., Кирилів Я. Б., Гусар Б. М., Войтович Т. М., Ковалишин Вол. В., Корнієнко А. О., Чернецький В. В. Перспективи гасіння пожеж водопінними вогнегасниками. *Пожежна безпека*. 2017. Vol. 31. Р. 49–58.
183. Less F.P. Loss prevention in the process industries. Elsevier. 497 p.
184. Person H., Lonnermark A. Tank fire review of fire incidents 1951-2003. Brandforsk Project 513-021. Boras : Swedish National Testing and Research Institute. 2004.
185. Casal J. Evaluation of the Effects and Consequences of Major Accidents in Industrial Plants. *Industrial Safety Series*. 2008. V. 8. 117 p.
186. Shen G.B. (2020) A Study on the Causes and Sustainability of The U.S. Trade Deficit --A Review of the Study on the U.S. Trade Deficit. *Journal of Changsha University of Science and Technology (Social Science Edition)*. 2020. Vol. 35(06). P. 105–110.
187. Zhang Q. L. Typical Fire cases of Oil storage tanks at home and abroad. Tianjin University Press, Tianjin. 2014.
188. Yuan C., Cui H., Tao B., Ma S. (2018). Cause factors in emergency process of fire accident for oil–gas storage and transportation based on fault tree analysis and modified Bayesian network model. *Energy & Environment*. 2018. Vol. 29(5). P. 802–821. URL: <https://www.jstor.org/stable/90023925>.
189. Li L., Dai L. Review on fire explosion research of crude oil storage tank. *E3S Web Conf. ICERSD 2020*. 2021. Vol. 236. 01022. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123601022>.
190. Chang J.I. et al. A study of storage tank accidents. *Journal of Loss Prevention in The Process Industries*. 2006. Vol. 19. P. 51-59.
191. Tauseef S. M., Abbasi T., Pompathi V., Abbasi S. A. Case studies of 28 major accidents of fires/explosions in storage tank farms in the backdrop of available codes/standards/models for safely configuring such tank farms, Process Safety and Environmental Protection. 2018. Vol. 120. P. 331-338. URL: <https://doi.org/10.1016/j.psep. 2018.09.017>.
192. Губар К., Пономаренко Р. Деякі питання безпеки праці під час гасіння пожеж при горінні нафтопродуктів у резервуарах. Теорія і практика гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій: матеріали XIV

Міжнародної науково-практичної конференції. Черкаси : ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України, 2023. С. 19–20.

193. Paula H. M. Insights from 595 tank farm fires from around the world. *Process Safety and Environmental Protection*. 2023. Vol. 171. P. 773–782. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pseP.2023.01.058>.

194. Paula H. M. Insights from 665 tank farm fires – The second database update Galvani Risk Consulting, LLC. The Woodlands, TX, United States. 2023. Vol. 42. Is. 3. P. 523–536. URL: <https://doi.org/10.1002/prs.12475>.

195. Doregar Zavareh R, Dana T, Roayaei E, Monavari SM, Jozi SA. The Environmental Risk Assessment of Fire and Explosion in Storage Tanks of Petroleum Products. *Sustainability*. 2022. Vol. 14(17). 10747. URL: <https://doi.org/10.3390/su141710747>.

196. Gant S., Bettis R., Santon R., Buckland I., Bowen P., Kay P. Generation of flammable mists from high flashpoint fluids: Literature review”, Health and Safety Executive, (2013). Health and Safety Executive, Research Report RR980. URL: <http://www.hse.gov.uk/research/rrhtm/rr980.htm>.

197. Guidelines for Seismic Evaluation and Design of Petrochemical Facilities/Committee on Seismic Evaluation and Design of the Petrochemical Committee of the Energy Division of the American Society of Civil Engineers. Reston, VA: American Society of Civil Engineers. 2011. 363 p.

198. Kovalov A., Otrosh Y., Rybka E., Kovalevska T., Togobytska V., Rolin I. Treatment of Determination Method for Strength Characteristics of Reinforcing Steel by Using Thread Cutting Method after Temperature Influence. In Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd. 2020. Vol. 1006. P. 179–184.

199. Surianinov M., Andronov V., Otrosh Y., Makovkina T., Vasiukov S. Concrete and fiber concrete impact strength. *Materials Science Forum*. 2020. 1006 MSF. P. 101–106.

200. Sun Y., Zhou D., Wang J. An equivalent mechanical model for fluid sloshing in a rigid cylindrical tank equipped with a rigid annular baffle. *Applied Mathematical Modelling*. 2019. Vol. 72. P. 569–587.

201. Zhou D., Wang J. D., Liu W. Q. Nonlinear sloshing of liquid in rigid cylindrical container with a rigid annular baffle: free vibration. *Nonlinear Dynamics*. 2014. Vol. 78(4), P. 2557–2576.

202. Sierikova O., Koloskov V., Degtyarev K., Strelnikova E. Improving the Mechanical Properties of Liquid Hydrocarbon Storage Tank Materials. *Materials Science Forum*. 2022. Vol. 1068. P. 223–229. DOI: 10.4028/p-888232.

203. Kushch V. I. Stress field and effective elastic moduli of periodic spheroidal particle composite with Gurtin-Murdoch interface. *International*

Journal of Engineering Science. 2018. Vol. 132. P. 79–96. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijengsci.2018.08.001>.

204. Gnitko V., Degtyariv K., Naumenko V., Strelnikova E. BEM and FEM analysis of the fluidstructure interaction in tanks with baffles, *Int. Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. 2017. Vol. 5 (3). P. 317–328. URL: <https://doi.org/10.2495/CMEM-V5-N3-317-328>.

205. Shugaylo O., Bilyk S. The Specifics of the Compilation of the Calculated Load Combinations in the Assessment of Seismic Resistance of Steel Supporting Structures of Nuclear Power Plant Equipment and Piping *J. of Mech. Eng.* 2022. Vol. 25 (3). P. 6-15. URL: <https://doi.org/10.15407/pmach2022.03.006>.

206. Серікова О. М., Стрельнікова О. О., Пісня Л. А., Крютченко Д. В. Дослідження впливу пікових амплітуд сейсмічного прискорення при землетрусі на техногенні об'єкти. Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: зб. наук. статей XVI Міжнародної науково-практичної конференції УКРНДІЕП (м. Харків, 14–18 вер. 2020 р.). 2020. С. 221–223.

207. Серікова О. М., Стрельнікова О. О., Пісня Л. А., Крютченко Д. В. Вплив сейсмічних навантажень на резервуари для збереження отруйних та легкозаймистих рідин. Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення: зб. наук. статей XVI Міжнародної науково-практичної конференції УКРНДІЕП (м. Харків, 14–18 вер. 2020 р.). 2020. С. 217–220.

208. Yadav R., Tirumali M., Wang X., Naebe M, Kandasubramanian B. Polymer composite for antistatic application in aerospace. *Defence Technology*. 2020. Vol. 16. Is. 1. P. 107–118. URL: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2019.04.008>.

209. Pramanik S., Hazarika J., Kumar A., Karak N. Castor oil based hyperbranched poly (ester amide) polyaniline nanofiber nanocomposites as antistatic materials. *Ind Eng Chem Res*. 2013. Vol. 52 (16). P. 5700–5707.

210. Baur J., Silverman E. Challenges and Opportunities in multifunctional nanocomposite structures for aerospace applications. *MRS Bull*. 2007. 32. P. 28–34.

211. Горових О. Г., Оразбаєв А. Р. Механізм електризації вуглеводневої рідини при заповненні нею резервуарів вертикального типу. *Надзвичайні ситуації: освіта і наука*. 2014. Т. 9. № 2. С. 16–22.

212. Горових О. Г., Оразбаєв А. Р. Визначення енергії розряду статичної електрики з падаючої краплею нафтопродукту. Об'єднання теорії та практики – запорука підвищення боєздатності оперативно-рятувальних підрозділів: Зб. тез. матеріалів Всеукр. наук.-практ. конф. (Харків, 21 берез. 2013 р.). НУЦЗ України. 2013. С. 286–288.

213. Huang J. C. Carbon black filled conducting polymers and polymer blends. *Adv Polym Technol: J Polym Proc Inst*. 2002. 21. P. 299–313.

214. Ravati S., Favis B. D. Low percolation threshold conductive device derived from a fivecomponent polymer blend. *Polymer*. 2010. V. 51. P. 3669–3684.

215. Гібридний електропровідний плівковий нанокомпозит для електромагнітного та електростатичного захисту: пат. 99185 Україна: H05K 9/00, МПК (2015.01). № у 2014 12311, заяв. 17.11.2014; опубл. 25.05.2015, Бюл. № 10. 5 с.

216. Дегтярьов К. Г. , Гнітько В. І., Стрельнікова О. О., Тонконоженко А. М. Розрахункові моделі для аналізу механічних властивостей тривимірних нанокомпозитів на основі методів скінчених та граничних елементів. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2018. № 2. С. 43–54.

217. Karaiev A., Strelnikova E., Axisymmetric polyharmonic spline approximation in the dual reciprocity method. *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*. 2021. Vol. 101. P. e201800339. URL: <https://doi.org/10.1002/zamm.201800339>.

218. Gnitko V., Degtyariov K., Karaiev A., Strelnikova E. Multi-domain boundary element method for axisymmetric problems in potential theory and linear isotropic elasticity. *WIT Transactions in Engineering Sciences. WIT Press: Southampton and Boston*. 2019. vol. 122. P. 13–25. URL: <https://doi.org/10.2495/BE410021>.

219. Srivastava H. M. Integral Transformations, Operational Calculus and Their Applications. *Symmetry*. 2020. Vol.12(7). 1169 p. URL: <https://doi.org/10.3390/sym12071169>.

220. Guo Y., Iyer S. Regularity and expansion for steady Prandtl equations, *Comm. Math. Phys.* 2021. 382(3). P. 1403–1447.

221. Behshad A., Reza Shekari M., 2018. A Boundary Element Study for Evaluation of the Effects of the Rigid Baffles on Liquid Sloshing in Rigid Containers. *International journal of maritime technology*. 2018. Vol.10. P. 45–54. URL: <https://doi.org/10.29252/ijmt.10.45>.

222. Godoy L. A. Buckling of vertical oil storage steel tanks: Review of static buckling studies//Thin Walled Struct. 2016. Vol. 103. P. 1–21.

223. Hamdan F.H. Seismic behaviour of cylindrical steel liquid storage tanks. *J. Constr. Steel Res.* 2000. Vol. 53. № 3. P. 307–333.

224. Hanson R. Behaviour of liquid storage tanks. The great Alaska Earthquake of 1964. Washington D.C.: Committee on the Alaska Earthquake, Division of the Earth Sciences, National Research Council, National Academy of Sciences.1973. P. 331–339.

225. Haroun M. A., Bhatia H. Analysis of tank damage during the 1994 Northridge Earthquake. Proceedings of the 4th US Conference on Lifeline Earthquake Engineering, ASCE. New York. 1995. P. 763–770.
226. Hatayama K. Lessons from the 2003 Tokachi-oki, Japan, earthquake for prediction of long-period strong ground motions and sloshing damage to oil storage tanks. J. Seismol. 2008. Vol. 12. № 2. P. 255–263.
227. Higuchi S., Mori T., Matsuda T., Goto Y., Akiyama H., Toki K., Kobayashi M. Seismic Performance of LNG Storage Tank Foundations During the Very Large Earthquake. 12th World Conferences on Earthquake Engineering. Auckland, New Zealand, 2000. P. 1–8.
228. Koketsu K., Miyake H. A seismological overview of long-period ground motion. J. Seismol. 2008. Vol. 12. № 2. P. 133–143.
229. Manos G. C., Clough R. W. Tank damage during the may 1983 coalinga earthquake. Earthq. Eng. Struct. Dyn. 1985. Vol. 13, № 4. P. 449–466.
230. Shimizu N. Advances and Trends in Seismic Design of Cylindrical Liquid Storage Tanks. JSME. 1990. Vol. 33, № 2. P. 111–124.
231. Lukovsky. Numerical simulation of sloshing of a liquid in a moving closed rectangular container. *International Journal of Fluid Mechanics Research*. 1999. Vol. 26.
232. Kubenko V. D., Koval'chuk P. S. Nonlinear problems of the dynamics of elastic shells partially filled with a liquid. *International Applied Mechanics*. 1999. Vol. 36. № 4. P. 421–448.
233. Strelnikova E., Gnitko V., Krutchenko D., Naumenko Y. Free and forced vibrations of liquid storage tanks with baffles. *Journal of Modern Technology & Engineering*. 2018. Vol. 3. № 1. P. 15–52.
234. Шульженко М. Г., Гонтаровський П. П., Гармаш Н. Г., Глядя А. О., Швецов В. Л., Гришин М. М., Губський О. М. Оцінка реакції потужного турбоагрегату на сейсмічне навантаження. Вібрації в техніці та технологіях. 2016. № 2 (82). С. 85–93.
235. Abramson, H. N., The Dynamic Behaviour of Liquids in Moving Containers. NASA SP- 106, Washington, D.C., 1966, updated by Dodge, F.T., Southwest Research Institute. 2000. P. 23-37.
236. Langeveld J. M. The Design of Large Steel Storage Tanks for Crude Oil and Natural. Gas. *Proceedings of the Annual Meeting of the International Institute of Welding*. 1974. P. 35–95.
237. Бредун В. І., Харламова О. В., Шмандій В. М. Механізм формування екологічної небезпеки у регіоні під впливом техногенної сейсмічності. Екологічний інтелект. 36. наук. праць за матеріалами V Міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених. (Дніпро, 08-09 квітня 2010 р.)

Дніпропетровськ : Дніпроп. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2010. С. 27–29.

238. Шмандій В. М., Бредун В. І. Особливості формування екологічної небезпеки у регіонів під впливом техногенних землетрусів. Збалансований (сталий) розвиток України – пріоритет національної політики: матеріали Всеукраїнської екологічної конф. (Київ, 26 жовтня 2010 р.). Київ : Центр екологічної інформації, 2010. С. 322–326.

239. Ha J. Gon, Park H. Joon, Lee M. Kyo, Lee H., Kim D.-S., Kwon S., Kim H. Seismic behavior of LNG storage tank considering soil-foundationstructure interaction with different foundation types. *Proc. of the 19th Intern. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (COEX, Seoul, Sep. 17 – 22, 2017) ed. by W. Lee, J.-S. Lee, H.-K. Kim, D.-S. Kim. Seoul. 2017. P. 931–934.

240. Бойченко С. В., Пузік О. Г., Топільницький П. І., Черняк Л. М., Романчук В. В., Бабатунд О., Лейда К. Оцінка екологічного впливу нафтопереробного підприємства на навколишнє середовище. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2016. № 4. С. 109–122.

241. Курганський В. М., Тішаєв І. В. До питання забруднення оточуючого середовища в процесі буріння нафтових та газових свердловин. *Вісник Київського національного університету ім. Т. Шевченка. Геологія*. 2006. Вип. 38–39. С. 7–9.

242. Клімова Н. Деякі питання методики оцінки стану забруднення ґрунтів унаслідок нафтогазовидобування. *Вісник Львівського університету. Серія географічна*. 2006. Вип. 33. С. 144–151.

243. Бабаджанова О. Ф., Гринчишин Н. М. Роль сорбентів при ліквідації аварійних виливів нафти і нафтопродуктів із поверхні ґрунту. Актуальні проблеми управління у сфері цивільного захисту: матеріали І Всеукраїнської науково-практичної конференції (Харків, 5 жовтня 2012 р.). Харків, 2012. С. 28–33.

244. Азаров С. І., Сидоренко В. Л., Задунай О. С. Розроблення засад класифікації небезпечних критично важливих об'єктів із загрозою виникнення техногенних надзвичайних ситуацій. *Науково-технічний журнал «Техногенноекологічна безпека»*. 2019. № 6(2). С. 3–11. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.3558940>.

245. Побережний Л. Я., Яворський А. В., Цих В. С., Станецький А. І., Грицанчук А. В. Підвищення рівня екологічної безпеки трубопровідних мереж нафтогазового комплексу України. *Науково-технічний журнал «Техногенноекологічна безпека»*. 2017. № 1. С. 24–31.

246. Лук'яненко Є. В., Янченко І. О., Аблєєва І. Ю. SWOT-аналіз технологій захисту гідросфери у нафтовидобувній галузі. Екологія, неоекологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване

природокористування: матеріали IX Міжнародної наукової конференції молодих вчених (Харків, 25–26 листопада 2021 р.). Харків : ХНУ ім. В.Н. Каразіна. 2021. С. 169–171.

247. Tadros A. F. F. Environmental aspects of petroleum storage in above ground tank. *E3S Web of Conferences The International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2020)*. 2020. Vol. 166. 01006. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016601006> ICSF 2020.

248. Siddiq M. A. Deformation and failure in nanomaterials via a data driven modelling approach. *Theoretical & Applied Mechanics Letters*. 2020. Vol. 10(4). P. 249-252. URL: <https://doi.org/10.1016/j.taml.2020.01.029>.

249. Shi L., Shuai J., Xu K. Fuzzy fault tree assessment based on improved AHP for fire and explosion accidents for steel oil storage tanks. *Journal of hazardous materials*. 2014. Vol. 278. P. 529–538. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.06.034>.

250. Sesetyan, K., Stucchi, M., Castelli, V., Gomez Capera, A. A. Kahramanmaras Gaziantep Türkiye M7.7 Earthquake, 6 February 2023 (04:17 GMT+03:00). Large historical earthquakes of the earthquake-affected region: a preliminary report. INGV, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Italy. 2023. URL: <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/2/en/>.

251. Адаменко О. М., Адаменко Я. О., Яцишин Т. М. та ін. Екологічна безпека нафтогазового комплексу у західному регіоні. Колективна монографія за ред. проф. Я. О. Адаменка. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2017.

252. Артемчук В. О., Попов О. О., Яцишин А. В., Кириленко Ю. О., Яцишин Т. М. Перспективи розробки математичних та програмних засобів перевірки екологічної ефективності прийняття управлінських рішень. Моделювання та інформаційні технології: зб. наук. пр. Ін-ту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. 2018. Вип. 85. С. 75–80.

253. Бакулін Є. М., Яворський М. М., Світлицький В. М. та ін. Концепція системи управління охороною навколишнього середовища на об'єктах ДК 354 «Укргазвидобування» відповідно до вимог стандартів ISO 14000. Нафтогазова енергетика. *Всеукраїнський науково-технічний журнал*. 2007. № 1(2). С. 5–11.

254. Венгерцев Ю. О. Концепція дослідження технічного стану сталевих резервуарів. *Нафтова і газова промисловість*. 2005. № 5. С. 53–55.

255. Венгерцев Ю. О., Бугай В. Ю. Прогнозування технічного стану і залишкового ресурсу експлуатації резервуарів. *Нафтова і газова промисловість*. 2005. № 6. С. 60–62.

256. Витвицький Я. С., Кернична А. Є. Механізм державного управління в екологічній сфері на регіональному рівні та напрямки його вдосконалення. *Актуальні проблеми державного управління*. 2012. № 2 (42). С. 178–186.
257. Козуля Т. В., Емельянова Д. І. Екологічний ризик на різних рівнях дослідження природно-техногенних систем, інформаційне забезпечення його оцінки. *Проблеми інформаційних технологій*. 2015. № 17. С. 138–144.
258. Матвійчук Н. М., Сидорук С. В. Формування системи індикаторів екологічної безпеки України. *Сталий розвиток економіки*. 2018. № 38. С. 113–119.
259. Степанюк Г. С. Особливості функціонування та проблеми управління техногенно небезпечними нафтогазовими підприємствами. *Науково-інформаційний вісник. Економіка*. 2015. № 11. С. 259–266.
260. Адаменко Я. О., Архипова Л. М. Екологічна оцінка гідроекосистем Битківського нафтопромислу. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2010. № 4. С. 136–143.
261. Адаменко Я. О. Оцінка впливів техногенно небезпечних об'єктів на навколишнє середовище. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2010. № 2. С. 58–63.
262. Клюк Б. О., Семчук Я. М. Моделювання забруднення довкілля методом збурень при відмові магістральних нафтопроводів. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2003. № 1(5). С. 94–95.
263. Кривенко Г. М., Семчук Я. М., Возняк М. П., Возняк Л. В. Вплив чинників на технічний ризик у ході експлуатації нафтопроводів. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2008. № 4. С. 108–111.
264. Демченко П. М., Рудько Г. І. Основні екологічні проблеми нафтогазового комплексу України. Матеріали науково-практичної конференції «Екологічні проблеми нафтогазового комплексу». 2003. Т. 23. С. 27.
265. Побережний Л. Я. Вплив аварій нафтогазопроводів на довкілля. *Экология и промышленность*. 2007. № 3 (12). С. 20–24.
266. Дригулич П. Г. Еколого-геологічний моніторинг забруднення довкілля об'єктами нафтогазового комплексу : автореф. дис. ... канд. геол. наук: спец. 21.06.01 "Екологічна безпека" Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу. Івано-Франківськ, 2008. 19 с.
267. Цайтлер М. Й. Заростання ділянок забруднених нафтопродуктами (на прикладі Бориславського нафтового родовища).

Дослідження, охорона та збагачення біорозмаїття. Львів : УкрДЛТУ. 1999. С. 151–154.

268. Бабаджанова О. Ф., Гринчишин Н. М., Сукач Ю. Г. Міграція нафти і нафтопродуктів у поверхневі шари ґрунту при аварійних розливах. Безпека життя і діяльності людини – освіта, наука, практика: зб. 129 наук. праць X міжнар. наук.-метод. конф. Київ : Національний авіаційний університет. 2011. С. 22–26.

269. Величко О., Терек О. Вплив нафтового забруднення ґрунту на вміст аскорбінової кислоти та активність аскорбатоксидази в органах рослин люцерни округлої. *Наук. вісн. ЛНАВМ ім. С. З. Гжицького*. 2008. Т. 10, № 3. Ч. 2. С. 144–148.

270. Величко О. І. Вміст нітратного азоту в ґрунті та органах рослин сої за умов забруднення ґрунту нафтою. *Науковий вісник НЛТУ України: збірник науково-технічних праць*. Львів : РВВ НЛТУ України. 2011. Вип. 21.16. С. 351–354.

271. Джура Н. М., Цвілинюк О. М., Терек О. І. Вплив нафтового забруднення на вміст макро- та мікроелементів у рослинах *Carex hirta* L. *Укр. ботан. журн.* 2007. Т. 64, # 1. № С. 122–131.

272. Панасенко Є. В. Вплив вуглеводнів нафти на зміну деяких водних показників чорноземного ґрунту. *Вісник ХНАУ. Ґрунтознавство*. 2008. № 2. С. 132–135.

273. Стецишин В., Градович М., Подан І., Гальчук Р., Джура Н., Шевчик Л., Романюк О. Вплив нафтового забруднення ґрунту на ріст рослин *Helianthus annuus* L., *Fagopyrum esculentum* Moench. і *Linum usitatissimum* L. Молодь і поступ біології: збірник тез XII міжнар. наук. конф. студентів і аспірантів (м. Львів, 19-21 квітня 2016 р.). Львів, 2016. С. 176–177.

274. Терек О. І., Величко О. І., Джура Н. М. Фізіологічні аспекти адаптації рослин до нафтозабрудненого ґрунту. *Фізіологія рослин: проблеми та перспективи розвитку: зб. наук. пр.* Київ : Логос. 2009. Т. 1. С. 217–225.

275. Шевчик Л. З., Жак Т. В., Романюк О. І., Джура Н. М., Подан І. І., Гальчук Р. І. Дослідження латеральної міграції нафтової плями за участю тестових рослин. *Фундаментальні та прикладні дослідження в біології та екології. Матер. IV міжнар. наук. конф. (м. Вінниця, 12-14 квітня, 2016 р.)*. Вінниця : ДРУК. 2016. С. 146–147.

276. Петренко О. В., Скрипник В. І. Вплив сейсмічних навантажень на резервуари зберігання рідких вуглеводнів. *Вісник Національного технічного університету "ХПІ"*. 2022. № 12 (1242). С. 114–121.

277. Кулик А. В., Ткаченко С. М. Підвищення сейсмостійкості резервуарів для зберігання нафти та продуктів її переробки. *Науковий вісник НТУУ "КПІ"*. 2023. № 2 (108). С. 102–108.

278. Зайцев Д. О., Скрипник О. Г. Розробка методів розрахунку сейсмостійкості резервуарів зрідженого природного газу. *Проблеми машинобудування*. 2023. № 2. С. 52–58.

279. Басманов О. Є., Говаленков С. В., Горбенко М. О. Вплив випадкових чинників на спалахування резервуарів з нафтопродуктами. *Прикладна геометрія та інженерна графіка. Праці Таврійська державна агротехнічна академія*. Мелітополь : ТДАТА, 2004. Вип. 4. Т. 26. С. 24–28.

280. Шугайло О-р П., Рижов Д. І. Загальні принципи оцінки сейсмічної міцності сталевих опорних конструкцій обладнання і трубопроводів атомних станцій відповідно до нормативних вимог. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2021. № 4(92). С. 4-11. URL: [https://doi.org/10.32918/nrs.2021.4\(92\).01](https://doi.org/10.32918/nrs.2021.4(92).01).

281. Шугайло О-р П., Білик С. І. Вплив зміни технологічних умов експлуатації сталевих опорних конструкцій обладнання та трубопроводів енергоблоків атомних станцій на їх сейсмічну міцність. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2022. № 1(93). С. 62–70. URL: [https://doi.org/10.32918/nrs.2021.1\(93\).07](https://doi.org/10.32918/nrs.2021.1(93).07).

282. Гарбуз С. В., Халмурадов Б. Д. Розрахунок можливих екологічно шкідливих викидів в атмосферу із резервуарів з залишками нафтопродуктів. Матеріали XIII міжнародної науково-технічної конференції «Авіа-2017». Національний авіаційний університет м. Київ. 2017. С. 787–793.

283. Пузік С. О., Островський Б. О., Комар Д. А. Методика розрахунку процесу примусової вентиляції резервуарів від залишків рідких 157 нафтопродуктів. *Вісник Національного авіаційного університету*. 2013. № 2. С. 109–113.

284. Гарбуз С. В., Ликов О. М. Дослідження техногенної та екологічної безпеки процесу рекуперації нафтопродуктів. Тези доповідей VII Всеукраїнської науково-практичної конференції з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист». (Черкаси, 20-21 жовт. 2017 р.). 2017. С. 149–151.

285. Гавадзин Н. О. Природно-техногенні процеси та економічні збитки від шкідливих впливів нафтогазових підприємств на навколишнє середовище. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2010. № 1. С. 125–130.

286. Максимюк М. Р., Міцкевич Д. І., Міцкевич А. І. Нафтове забруднення поверхневих вод та шляхи подолання його наслідків. Наукові праці Чорноморського державного університету імені Петра Могили

комплексу «Києво-Могилянська академія». Сер.: Техногенна безпека. 2014. Т.233, Вип. 221. С. 37–40.

287. Курганський В. М., Тішаєв І. В. До питання забруднення оточуючого середовища в процесі буріння нафтових та газових свердловин. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка*. 2006. № 38. С. 7–9.

288. Іванюта С. Моніторинг та оцінювання екологічних ризиків техногенного походження. Аналітична доповідь Київ : Вид-во НІСД, 2012. 52 с.

289. Рудько Г. І., Адаменко Я. О., Пилипенко А. А. та ін.. Оцінка впливів на навколишнє середовище (ОВНС) при експлуатації Новосхідницького нафтового родовища. Геоекологічні проблеми Івано-Франківщини та Карпатського регіону: зб. наук. праць. Івано-Франківськ: ЕКОР. 1998. С. 149–196.

290. Крайнюков О. М. Особливості розповсюдження вуглеводневого забруднення та оцінка його впливу на геоекологічний стан басейну р. Сіверський Донець у межах Харківської області : автореф. дис. ... канд. геогр. наук: 11.00.11 «Конструктивна географія і раціональне використання природних ресурсів». Харків, 2007. 20 с.

291. Іщук Ю. Л., Кобилянський Є. В., Кочірко Б. Ф. Біорозщеплюваність нафтопродуктів і проблеми біосфери. *Нафтова і газова промисловість*. 2004. № 1. С. 57–60.

292. Гринюк В. І. Міграція нафтопродуктів в зоні впливу нафтогазовидобувних підприємств. Сучасний стан та якість навколишнього середовища окремих регіонів: зб. наук.праць Міжнародної наукової конференції молодих вчених. (Одеса, 1–3 червня 2016 р.). 2016. С. 85–88.

293. Гринюк В. І. Техногенне навантаження нафтогазовидобувних підприємств на водне середовище. XVI Всеукраїнська наук.-техн. конф. (Одеса, 14 квітня 2016 р.). 2016. С. 22–24.

294. Тимченко І. В. Дослідження моделей розповсюдження нафтових забруднень в умовах обмежених акваторій. *Електронний вісник НУК*. 2010. № 1.

295. Ковач В. О. Аналіз надзвичайних ситуацій, пов'язаних із розливами нафти внаслідок аварій танкерів та інших суден. Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ІПМЕ ім Г.Є. Пухова НАН України. 2016. Вип. 77. С. 73–82.

296. Ковач В. О. Розробка математичних засобів для оцінки рівня забруднення поверхні моря в результаті розливу нафти: матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Теорія і практика гасіння

пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій» (Черкаси, 19–20 травня 2016 р.). Черкаси : ЧІПБ ім. Героїв Чорнобиля НУЦЗ України. 2016. С. 63–65.

297. Харламова О. В. Науково-методологічні основи управління екологічною безпекою в умовах природно-антропогенного навантаження : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 21.06.01. Суми, 2018. 38 с.

298. Челядин Л. І., Григорчук Л. І., Челядин В. Л., Богославець М. М. Методи та устаткування зменшення забруднення водних ресурсів стоками з об'єктів нафтогазового комплексу. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2013. № 2(47). С. 145–151.

299. Бондарець Ю. В., Матвєєва О. Л. Аналіз технологій ліквідації нафторозливів із застосуванням сорбентів на основі торфового моху роду *Sphagnum*. *Проблеми екологічної біотехнології*. 2013. № 1. URL: <http://jrn1.nau.edu.ua/index.php/ecobiotech/article/view/4732>.

300. Назаренко С. К., Архипова Л. М. Сучасні методи ліквідації аварійних розливів нафти на водних об'єктах суходолу. *Науковий вісник ІваноФранківського національного технічного університету нафти і газу*. 2016. № 1. С. 72–79.

301. Zhao H., Liu J.-S. The feasibility study of extinguishing oil tank fire by using compressed air foam system. *Procedia Engineering*. 2016. Vol. 135. P. 61-66. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.01.080>.

302. Xu-Qing L., Quan-Zhen L., Hong G. Study of fire fighting system to extinguish full surface fire of large scale floating roof tanks. *Procedia Engineering*. 2011. Vol. 11. P. 189-195. URL: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.646>.

303. Чернецький В. В. Вплив теплових факторів пожежі на цілісність вертикальних сталевих резервуарів з нафтопродуктами : дис. ... канд. тех. наук: 21.06.02. ЛДУБЖД. Львів. 2015.

304. Кондратович О. А., Оразбаєв А. Р. Визначення причини виникнення пожеж при завантаженні нафтопродуктів в резервуари. *Надзвичайні ситуації: попередження і ліквідація*. 2018. Вип. 1. С. 77–82.

305. Charuaud L., Jarde E., Jaffrezic A., Thomas M.-F., Le Bot B. Veterinary pharmaceutical residues from natural water to tap water: Sales, occurrence and fate. *Journal of Hazardous Materials*. 2019. Vol. 361. P. 169–186. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.08.075>.

306. Gros M., Mas-Pla J., Boy-Roura M., Geli I., Domingo F., Petrović M. Veterinary pharmaceuticals and antibiotics in manure and slurry and their fate in amended agricultural soils: Findings from an experimental field site (Baix Empordà, NE Catalonia). *Science of The Total Environment*. 2019. Vol. 654. P. 1337–1349. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.061>.

307. Trávníček P., Kotek L., Junga P., Koutný T., Novotná J., Vítěz T. Prevention of accidents to storage tanks for liquid products used in agriculture. *Process Safety and Environmental Protection*. 2019. Vol. 128. P. 193–202.

308. Vescovini R., Fantuzzi N. Free vibrations of conical shells via Ritz method. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2023. Vol. 241:107925. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107925>.

309. Аблеева І. Ю., Пляцук Л. Д. Системний підхід до підвищення екологічної безпеки нафтовидобувних територій: монографія. Суми : СумДУ, 2021. 275 с.

310. Tursunkululy, T., Zhangabay, N., Avramov, K., Chernobryvko, M., Suleimenov, U., Utelbayeva, A., Duissenbekov, B., Aikozov, Y., Dautbek, B., Abdimanat, Z. (2022). Strength analysis of prestressed vertical cylindrical steel oil tanks under operational and dynamic loads. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2 (7 (116)): 14–21. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.254218>.

ДОДАТКИ

Додаток А

Проект

КОНЦЕПЦІЯ ЩОДО ЗНИЖЕННЯ ТЕХНОГЕННОГО ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ ВІД РЕЗЕРВУАРІВ ЗБЕРІГАННЯ РІДКИХ ВУГЛЕВОДНІВ В УМОВАХ СЕЙСМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Дана концепція визначає основні принципи державної політики в Україні в сфері екологічної безпеки щодо зниження техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів в умовах сейсмічних навантажень і напрям подальшого розвитку державної системи екологічної безпеки в Україні.

Проблема, що потребує свого розв'язання на рівні держави

Сучасний стан та моніторинг екологічної ситуації в державі свідчить про нагальну необхідність удосконалення законодавчих, нормативно-правових, організаційних та інших заходів, спрямованих на запобігання і нейтралізацію негативного техногенного впливу на довкілля, зокрема від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів в умовах сейсмічних навантажень. Важливу роль при цьому мають відігравати органи державної влади, відповідальні за екологічну безпеку та надзвичайні ситуації в країні. На сучасному етапі розвитку держави, підвищенню рівня техногенних ризиків сприяє недостатній рівень технічного оснащення та застарілі технології, незадовільний стан багатьох резервуарів, недоліки в системі моніторингу, а також низький рівень екологічної свідомості керівників підприємств та населення. Техногенному впливу сприяють глобальні зміни клімату, урбанізація, зростання обсягів зберігання та споживання рідких вуглеводнів, що погіршують стан довкілля. При цьому суттєво впливають природні умови розташування України у сейсмічно активних зонах, що створює умови для обрання стратегічного курсу на інтеграцію у європейський екологічний простір та дає можливість бути транзитною країною для енергетичних ресурсів. Це спричиняє підвищену відповідальність за дотримання міжнародних стандартів екологічної безпеки та управління техногенними ризиками. В умовах глобалізації та відкритості кордонів виникає потенційна загроза поширення техногенних катастроф, що можуть мати транскордонний характер. Це вимагає підвищення рівня міжнародного співробітництва, обміну досвідом та інформацією, впровадження найкращих практик у сфері екологічної безпеки.

Перед державними органами, науковою спільнотою, підприємствами та громадськістю постають нові, раніше невідомі, але вкрай необхідні та невідкладні завдання щодо визначення стратегічних напрямів зниження

техногенного впливу на довкілля, пошуку нових підходів та удосконалення більш ефективних заходів та зусиль по усуненню чинників, що сприяють виникненню техногенних катастроф. Реалізація цієї концепції сприятиме відновленню навколишнього середовища та підвищенню рівня екологічної безпеки в Україні, забезпеченню досягнення цілей щодо забезпечення сталого розвитку та потенціалу держави.

Мета, строки і напрями реалізації Концепції

Метою цієї Концепції є визначення напрямів та механізмів реалізації державної політики у сфері зниження техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях шляхом формування нових та вдосконалення існуючих законодавчих, технічних норм і нормативно-правових актів, зокрема у галузях екологічного, будівельного права, а також постійного узагальнення практичного застосування. Це включає розроблення та реалізацію організаційних, запобіжних і технічних заходів, спрямованих на запобігання, усунення причин і умов, що призводять до підвищення аварійності резервуарів в умовах сейсмічних навантажень, нейтралізацію та мінімізацію негативного впливу на навколишнє середовище, а також проведення комплексу запобіжних та попереджувальних заходів з боку державних органів влади, насамперед, Міністерства енергетики України, Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, Державної служби України з надзвичайних ситуацій, та зокрема технічних підрозділів окремих підприємств, які займаються запобіганням, попередженням та своєчасно реагують на аварійні ситуації.

Концепція спрямована на захист екологічних прав і свобод людини та громадянина і юридичних осіб, державних інтересів та суспільства, а також на забезпечення екологічної безпеки шляхом розробки, запровадження комплексу заходів щодо зниження техногенного впливу від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях. Це включає підвищення надійності та безпеки таких об'єктів, здійснення їх сертифікації та контролю відповідно до міжнародних стандартів, виявлення та усунення потенційних ризиків, впровадження сучасних технологій моніторингу, а також забезпечення готовності до оперативного реагування на надзвичайні ситуації з метою мінімізації шкоди довкіллю та здоров'ю населення та окремих осіб.

Реалізація Концепції передбачається протягом 2025-2030 років, з можливістю подальшого продовження та вдосконалення заходів відповідно до отриманих результатів, розвитку технологій та змін законодавчої бази України.

Завдання Концепції

Завданнями цієї концепції є:

- ефективне забезпечення безпеки населення та навколишнього середовища від можливих техногенних аварій на резервуарах зберігання рідких вуглеводнів під час сейсмічних навантажень;
- підтримка у постійній готовності, удосконаленні та ефективному використанні інженерних і технологічних засобів, зокрема систем сейсмостійкого захисту резервуарів, з метою своєчасного виявлення, запобігання, попередження й мінімізації наслідків можливих аварій;

- постійний моніторинг, аналіз та оцінка сейсмічної активності і технічного стану резервуарів, з'ясування причин та умов, що сприяють підвищенню ризику техногенних впливів, прогнозування потенційних загроз та можливих негативних наслідків для довкілля;
- своєчасне прийняття міжнародних правових актів з питань екологічної безпеки, сприяння прийняттю нових нормативно-правових актів та імплементації європейських стандартів (підходів) у національне законодавство України з питань зниження техногенного впливу на довкілля;
- впровадження інноваційних рішень, технологій та матеріалів при будівництві та експлуатації резервуарів для підвищення їх сейсмостійкості та екологічної безпеки;
- удосконалення існуючих методик щодо проектування, будівництва та експлуатації резервуарів зберігання рідких вуглеводнів з урахуванням сейсмічних ризиків, які готуються до будівництва або вже експлуатуються, з метою запобігання аваріям та для зниження техногенного впливу на довкілля;
- виявлення, попередження, припинення і усунення причин та умов, що сприяють виникненню техногенних ризиків від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів під час сейсмічних навантажень.

Напрямами виконання Концепції є:

Напрямами виконання Концепції зниження техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях є:

- визначення заходів і способів мінімізації ризику потрапляння рідких вуглеводнів у довкілля з резервуарів зберігання в умовах сейсмічних навантажень;
- удосконалення міжнародної співпраці з метою вивчення досвіду у сфері зниження техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів;
- розробка нових сучасних технологій та матеріалів для будівництва резервуарів зберігання рідких вуглеводнів, які будуть стійкими до сейсмічних навантажень;
- удосконалення системи моніторингу за станом резервуарів зберігання рідких вуглеводнів;
- підвищення рівня інформованості суспільства про ризики, пов'язані з техногенним впливом на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів;
- розробка освітніх програм підготовки фахівців з метою підвищення їхньої кваліфікації у сфері зниження техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів;
- створення системи та алгоритмів швидкого реагування на аварії на резервуарах зберігання рідких вуглеводнів з метою мінімізації негативних наслідків такого роду аварій;
- ініціювання вдосконалення міжнародно-правових актів та гармонізації національного законодавства з питань зниження техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях, зокрема із законодавством Європейського Союзу;

- удосконалення правових механізмів та організаційних засад організацій і підпорядкованих їм підрозділів зниження техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях;

- постійний моніторинг, аналіз та оцінка за його результатами виникнення потенційних загроз техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів в умовах сейсмічних навантажень, з'ясування причин та умов, що сприяють їх поширенню, напрацювання конкретних пропозицій, рекомендацій щодо їх усунення;

- підвищення рівня інформованості суспільства та населення про алгоритм дій в умовах виникнення екологічної небезпеки від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях;

- удосконалювати існуючі та розробляти нові методики в цьому напрямі.

Шляхи та засоби розв'язання проблеми

Проблему зниження техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів в умовах сейсмічних навантажень передбачається розв'язати наступним шляхом:

- проведення постійного моніторингу за технічним станом резервуарів зберігання рідких вуглеводнів та оцінювання ступеню ризику техногенного впливу на довкілля в умовах сейсмічних навантажень;

- розроблення та впровадження нових сучасних технологій та методів зберігання рідких вуглеводнів, що забезпечують безпеку та мінімізацію впливу на довкілля;

- удосконалення існуючих та розроблення нових нормативно-правових актів, що регулюють діяльність із зберігання рідких вуглеводнів в умовах сейсмічних навантажень;

- проведення наукових досліджень щодо мінімізації техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів в умовах сейсмічних навантажень та розроблення практичних рекомендацій щодо їхнього проектування, будівництва та експлуатації;

- поліпшення стану організаційно-аналітичного забезпечення підприємств, що експлуатують резервуари зберігання рідких вуглеводнів, та використання сучасних методів та засобів моніторингу довкілля, прогнозування й контролю за технічним станом резервуарів;

- належного матеріально-технічного та ресурсного забезпечення підприємств, що експлуатують резервуари зберігання рідких вуглеводнів, для забезпечення їхньої безпечної експлуатації, у т.ч. в умовах сейсмічних навантажень;

- розроблення та впровадження освітніх програм з підготовки здобувачів вищої освіти та підвищення кваліфікації і підготовки фахівців, що експлуатують резервуари зберігання рідких вуглеводнів, з питань забезпечення безпеки та запобігання техногенному впливу на довкілля в умовах сейсмічних навантажень.

3 метою реалізації поставлених завдань Концепції – пропонується:

3 метою реалізації поставлених завдань щодо зниження техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях пропонується:

- забезпечити прозорість під час прийняття управлінських рішень органами центральної і регіональними гілками державної влади, підприємствами та організаціями, що експлуатують резервуари зберігання рідких вуглеводнів, щодо розробки та вжиття заходів із запобігання техногенному впливу на довкілля;

- підвищити рівень взаємодії підприємств та організацій, що експлуатують резервуари зберігання рідких вуглеводнів, з державними органами та науковими установами з питань зниження техногенного впливу на довкілля;

- запровадити сучасний ефективний правовий механізм заохочення підприємств та організацій до впровадження заходів із зниження техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів;

- розробити ефективну систему державного контролю щодо експлуатації резервуарів зберігання рідких вуглеводнів та інформування підприємств та організацій про необхідність виконання заходів із зниження техногенного впливу на довкілля;

- продовжувати виявлення та оцінювання ризиків техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів й розробляти та вживати заходи із їхнього мінімізації;

- посилити заходи щодо виявлення та припинення діяльності підприємств та організацій, що експлуатують резервуари зберігання рідких вуглеводнів без дотримання вимог щодо зниження техногенного впливу на довкілля;

- своєчасне забезпечення унеможливлення використання підприємствами та організаціями резервуарів зберігання рідких вуглеводнів без дотримання вимог щодо зниження техногенного впливу на довкілля;

- підвищити ефективність запобіжних заходів підприємств та організацій на ранніх стадіях, зокрема готування та експлуатації резервуарів зберігання рідких вуглеводнів, щодо зниження техногенного впливу на довкілля;

з метою забезпечення мінімізації техногенному впливу на довкілля необхідно впровадити ефективні заходи організаційного, кадрового та матеріально-технічного характеру, що спрямовані на:

- посилення внутрішнього контролю за станом роботи щодо зниження техногенного впливу на довкілля на підприємствах та організаціях;

- здійснення навчання, підвищення кваліфікації та стажування працівників, які беруть участь у експлуатації резервуарів зберігання рідких вуглеводнів;

- удосконалення та запровадження позитивного досвіду відповідно до сучасних потреб, результатів наукових досліджень і міжнародного досвіду щодо забезпечення необхідного рівня професійної підготовки працівників, які займаються експлуатацією резервуарів зберігання рідких вуглеводнів;

- забезпечення підприємств та організацій з цієї діяльності необхідними технічними засобами, обладнанням та матеріалами для впровадження заходів із зниження техногенного впливу на довкілля.

Правове, інформаційне та наукове забезпечення зниження техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів в умовах сейсмічних навантажень має включати наступне:

Законодавча, нормативно-правова база зниження техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів в умовах сейсмічних навантажень повинна відповідати наступним вимогам:

- гнучко і адекватно реагувати на постійні зміни в сфері техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів в умовах сейсмічних навантажень, постійно удосконалювати форми і методи діяльності суб'єктів щодо зниження техногенного впливу на довкілля;

- враховувати і використовувати міжнародний досвід, реальні технічні, екологічні та інші рішення і підходи до зниження техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів в умовах сейсмічних навантажень;

- організація і введення постійного моніторингу та аналізу за його результатами проблем в організації діяльності суб'єктів зниження техногенного впливу на довкілля, законодавства України та міжнародного досвіду в цій галузі, підготовку і прийняття відповідних законодавчих актів, спрямованих на зниження техногенного впливу на довкілля;

- проведення експертиз проектів законодавчих і нормативно-правових актів України з метою удосконалення окремих положень, реалізація яких може сприяти зниженню техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів в умовах сейсмічних навантажень;

- формування усіма засобами масової інформації суспільної думки з метою сприяння ефективній реалізації державної політики у сфері екологічної безпеки, зокрема зниження техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів в умовах сейсмічних навантажень;

- забезпечення доступу до інформації про техногенний вплив на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів в умовах сейсмічних навантажень для населення, підприємств та організацій, що експлуатують ці резервуари;

- розвиток наукових досліджень у сфері зниження техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів в умовах сейсмічних навантажень та впровадження їх результатів у практичну діяльність;

- проведення освітніх програм та підготовки спеціалістів у сфері зниження техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів в умовах сейсмічних навантажень.

Інформаційне забезпечення зниження техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях має включати наступні завдання:

- удосконалення системи моніторингу стану довкілля в частині техногенного впливу від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях у державі в цілому та її регіонах зокрема;

- дослідження основних чинників, що визначають стан техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях;

- аналіз інформації про прояви техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях, а також про соціально-економічні та інші суспільні процеси в Україні та у світі, що здійснюють негативний вплив на ситуацію у сфері захисту довкілля;
- організація та здійснення інформаційної взаємодії суб'єктів зниження техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях;
- взаємообмін інформацією, що міститься в централізованих, обласних та інших банках даних про стан довкілля та техногенний вплив від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях;
- дослідження рівня ризиків та виявлення чинників, що сприяють зростанню ризиків техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях;
- вдосконалення стратегії і тактики застосування системи заходів щодо зниження техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях;
- надання засобам масової інформації відомостей для об'єктивного інформування населення України про проблеми захисту довкілля та шляхи їх вирішення;
- створення умов для залучення громадських та інших організацій, засобів масової інформації до поширення інформації про діяльність підприємств та організацій, що експлуатують резервуари зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях, обміну інформацією в цих питаннях на міждержавному та міжвідомчому рівнях.

Наукове забезпечення зниження техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях має включати наступні завдання:

- проведення наукових досліджень та розробка теоретичних і прикладних завдань для вирішення конкретних напрямів діяльності в сфері екологічної безпеки;
- проведення науково-прикладних досліджень для прийняття правових, організаційних і управлінських рішень у сфері захисту довкілля на різних рівнях;
- розробка інноваційних технологій та конструктивних рішень для підвищення сейсмостійкості резервуарів та зниження техногенного впливу резервуарів на довкілля;
- розробка експериментальних досліджень динамічної поведінки резервуарів при сейсмічних навантаженнях та верифікація розроблених математичних моделей;
- розробка комплексної оцінки техногенного впливу резервуарів на довкілля з урахуванням сейсмічної небезпеки та оцінки екологічних ризиків;
- розробка науково обґрунтованих рекомендацій щодо проектування, будівництва та експлуатації резервуарів зберігання рідких вуглеводнів в сейсмічно активних регіонах з метою мінімізації техногенного впливу на довкілля;
- розробка рекомендацій, пам'яток, інших видів наочної інформації для використання при проведенні заходів щодо профілактики техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних

навантаженнях, розраховану на підприємства та організації, що експлуатують ці резервуари.

Правове забезпечення зниження техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях має включати наступні завдання:

- розробка та вдосконалення законодавчих та нормативно-правових актів України щодо захисту довкілля та зниження техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях;

- вдосконалення системи державного контролю та нагляду за діяльністю підприємств та організацій, що експлуатують резервуари зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях;

- розробка та вдосконалення систем управління ризиками техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях;

- створення умов для залучення громадських та інших організацій до процесу розробки та реалізації законодавчих та нормативно-правових актів України щодо захисту довкілля та зниження техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях.

Механізм реалізації Концепції

Реалізацію Концепції слід здійснювати на засадах програмно-цільового підходу. Відповідні конкретні організаційні й нормативно-правові заходи мають розроблятися у межах спеціальної цільової програми, прийнятої Міністерством екології та природних ресурсів України і Державною агенцією України з управління зоною відчуження.

Доцільно реалізувати низку наступних заходів:

- розробити типові комплексні моделі оцінки рівня техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях, зокрема окремого регіону;

- на основі вказаних моделей здійснювати постійний моніторинг та прогнозування стану й тенденцій розвитку техногенного впливу на довкілля та у разі змін своєчасно застосовувати заходи реагування;

- Міністерству екології та природних ресурсів України розробити та запровадити цілеспрямовану та ефективну програму взаємодії державних органів у сфері захисту довкілля від техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів в умовах сейсмічних навантажень. В основу даної програми, окрім головних напрямів взаємодії та шляхів їх практичної реалізації, мають бути враховані питання, що практично забезпечуватимуть здійснення такої взаємодії;

- підприємствам та організаціям, що експлуатують резервуари зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях, розробити та впровадити в практику ефективний та оптимальний механізм практичної реалізації положень законодавства про захист довкілля та забезпечення особистої безпеки працівників та населення;

– Міністерству екології та природних ресурсів України внести на розгляд комітету Верховної Ради України з питань екологічної політики та природокористування обґрунтовані пропозиції про внесення доповнень до окремих законів України та проектів нових законів щодо можливості посилення заходів захисту довкілля від техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях. Одночасно з цим забезпечити розробку проектів підзаконних нормативно-правових документу, а саме розробити та запровадити довгострокову програму поступового посилення заходів захисту довкілля від техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів в умовах сейсмічних навантажень.

Очікувані результати реалізації Концепції

Реалізація Концепції зниження техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів при сейсмічних навантаженнях сприятиме: зменшенню ризику виходу рідких вуглеводнів у навколишнє середовище та мінімізації наслідків такого роду аварій; зміцненню екологічної безпеки держави та захисту навколишнього середовища від техногенного впливу; підвищенню рівня інформованості суспільства про ризики, пов'язані з техногенним впливом на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів; зростанню довіри інститутів громадянського суспільства до органів державної влади і підприємств, що займаються зберіганням рідких вуглеводнів; зміцненню співпраці між Україною та міжнародними організаціями у сфері охорони навколишнього середовища та захисту від техногенного впливу; підвищенню рівня захищеності громадян від наслідків техногенного впливу на довкілля від резервуарів зберігання рідких вуглеводнів; зміцненню позитивного іміджу України на міжнародному рівні як держави, що відповідає за захист навколишнього середовища та забезпечення екологічної безпеки в цілому, переходу країни на засади сталого розвитку.

Джерела фінансування, необхідні для реалізації Концепції

Фінансування заходів із реалізації Концепції здійснюватиметься за рахунок щорічних коштів державного і місцевих бюджетів та інших джерел, зокрема з позабюджетних джерел не заборонених законодавством України, зокрема створення фондів, отримання та надання грантів з метою стимулювання діяльності у зазначеній галузі та підвищення її ефективності і має здійснюватися не тільки за рахунок збільшення обсягів фінансування з бюджетів різного рівня, але й за рахунок залучення інвестиційних коштів.

Додаток Б

Таблиця Г 1.

Проект комплексу заходів щодо забезпечення екологічної безпеки процесу зберігання рідких вуглеводнів в резервуарах при сейсмічних навантаженнях

Зацікавлені сторони	Заходи з попередження аварій	Завдання з попередження аварій	Мета завдань	Пріоритетність та терміни виконання	Джерело фінансування
Власник резервуарного парку	Інженерні заходи	Встановлення датчиків тиску, температури та диму на резервуарах	Раннє виявлення можливих витоків чи порушень у роботі РЗРВ	Першочергове	Бюджет підприємства
Власник резервуарного парку		Встановлення датчиків та системи моніторингу рівня рідини у резервуарах в режимі онлайн.			
Власник резервуарного парку, місцеві органи влади		Встановлення систем автоматичного виявлення та гасіння пожеж, виведення сигналу до чергової частини ДСНС, встановлення автоматичного сигналу небезпеки (Сирена).	Забезпечення вчасної реакції на аварійні ситуації	Першочергове	Бюджет підприємства та місцевий бюджет
Власник резервуарного парку, місцеві		Здійснення відокремлення матеріалів: встановлення вторинних	Зменшення ризику витоків та забезпечення	Друга черга	Бюджет підприємства

органи влади		контейнерів для зберігання рідких речовин; матеріали з високою запальністю відокремити від інших матеріалів та розташовуват и в окремих та спеціальних контейнерах	попередж ення пожеж		
Власник резерву арного парку, місцеві органи влади		Встановлення ізолюючої стіни в ґрунті (протифільтра ційна завіса проти розтікання плями рідких вуглеводнів; армування вертикальним и ґрунтоцемент ними елементами)	Уникнення проникнен ня нафтової рідини до ґрунту та гідросфер и у разі протікання резервуарі в; збереженн я стійкості резервуар а при сейсмічних навантаже ннях	Друга черга	Бюдже т підприє мства
Місцеві органи влади, Власник резерву арного парку	Контрол ь та управлі ння	Розробка та реалізація плану евакуації та ліквідації наслідків аварії Оцінка ризиків можливих аварійних ситуацій	Забезпече ння швидкої та ефективної реакції на можливі катастроф и	Першоч ергово	Місцев ий бюдже т

		Проведення регулярних інспекцій резервуарного парку для перевірки забезпечення належної експлуатації, моніторинг ґрунту та гідросфери, моніторинг сейсмічних подій	Виявлення можливих проблем та недоліків у роботі парку, що можуть призвести до катастроф	Кожні півроку	Місцевий бюджет
		Вивчення передового досвіду інших країн з попередження та ліквідації аварій на РЗРВ	Підвищення рівня попереджувальних заходів	Щороку	Місцевий бюджет, міжнародні гранти
Місцева влада, підприємство		Організація навчання та тренувань для персоналу підприємства згідно розробленого плану евакуації та ліквідації наслідків. Коригування планів за результатами виявлених недоліків.	Забезпечення належної реакції персоналу на аварійні ситуації та запобігання їх виникненню	Раз на півроку одночасно	Бюджет підприємства
Місцева влада, екологічні організації, місцеві мешканці		Організація навчання та тренувань для населення, що проживає в зоні можливого настання негативних наслідків	Забезпечення належної реакції мешканців на аварійні ситуації та запобігання їх		Місцевий бюджет

		аварії згідно розробленого плану евакуації та ліквідації наслідків. Коригування планів за результатами виявлених недоліків.	виникненн ю		
Місцеві органи влади, екологічні організації		Вільний доступ до інформації щодо ризиків аварії, заходів з попередженн я та ліквідації наслідків пожежі чи витоку рідини.	Для зменшенн я негативних наслідків від можливої аварії	Постійн о	Місцев ий бюдже т, інвести ції

Наукове видання

СЕРІКОВА ОЛЕНА МИКОЛАЇВНА

**ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ
РЕЗЕРВУАРІВ ЗБЕРІГАННЯ РІДКИХ ВУГЛЕВОДНІВ ПРИ СЕЙСМІЧНИХ
НАВАНТАЖЕННЯХ: ТЕОРІЯ ТА ПРАКТИКА**

МОНОГРАФІЯ

Редактор, технічний редактор, коректор А.С.Тяпкін

Підписано до друку 30.12.2024. Формат 60x84 1/16 Ум.друк.арк. 21.3
Тираж 300 прим. Зам. №27/12-24

Видавництво «Факт»

Україна, 61166, м. Харків, вул. Бакуліна, 11, оф.2-26.

+38(050) 323-22-01, publish_fakt@ukr.net

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3172 від 22.04.2008р.

Надруковано ФОП Секішова Т.Є.

61072, м. Харків, вул. Тобольська, 42-а

067-709-71-16, u2-u2@ukr.net, u2print.com.ua

Свідоцтво про державну реєстрацію
за № 2 480 000 0000 079758 від 21.05.2007р.
