НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ

Кафедра прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки

«До захисту допущено»

В.о. завідувача кафедри
_____ Олександр ЛУГОВСЬКИЙ

“___”_____2023 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Автоматизовані та роботизовані механічні системи»
спеціальності 131 Прикладна механіка

на тему: Демпфер коливань рідини у резервуарах

Виконав (-ла): студент (-ка) 4 курсу, групи МА-91

Бардін Владислав Андрійович _____
(прізвище, ім’я, по батькові) (підпис)

Керівник д.ц.н., професор Ковальов Василь Анатолійович _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант з охорони праці ст.викл., к.т.н. Ковтун А.І. _____
(назва розділу) (вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Консультант з технології машинобудування к.т.н.,доц. Корєньков В.М. _____
(назва розділу) (вчені ступінь та звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент _____ _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____
(підпис)

Київ – 2023 рік

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Навчально-науковий механіко-машинобудівний інститут
Кафедра прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 131 Прикладна механіка

Освітньо-професійна програма «Автоматизовані та роботизовані механічні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри
_____ Олександр ЛУГОВСЬКИЙ

“___”_____2023 р.

ЗАВДАННЯ на дипломний проект студенту

Бардіна Владислава Андрійовича
(прізвище, ім’я, по батькові)

1. Тема проекту: Демпфер коливань рідини у резервуарах .

Керівник проекту: д.ц.н., професор Ковальов Василь Анатольович .
(посада, вчені ступінь та звання, прізвище, ім’я, по батькові)

Затверджено наказом по університету від “ 25 ” 05 2023 року № 1951-с

2. Термін подання студентом проекту: .
3. Вихідні дані до проекту: рідина – дизельне пальне, Час спостереження 10с, Відсоток заповнення резервуара 70%, Макс. Прискорення $10 м/с^2$.
4. Зміст пояснювальної записки: Розділ 1. Теоретичні відомості о коливаннях рідини у резервуарів та методів їх демпфування, Розділ 2. Моделювання демпферу коливань рідини у резервуарі, Розділ 3. Аналіз отриманих даних, Розділ 4. Технології виготовлення перегородки, Розділ 5. Охорона праці.
5. Перелік графічного матеріалу(із зазначенням обов’язкових креслень, плакатів, презентацій, тощо): Загальний вид вагону-цистерни 15-7076 оформлений на листі формату А3, Загальне креслення цистерни типу 66 на листі формату А3, Креслення перегородки на листі формату А4,

Плакат «Профілі внутрішніх потоків» А3, Плакат «Коливання рідини у резервуарі» А3, Плакат «Аналіз отриманих даних моделювання» А3.

6. Консультанти розділів проекту:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1. Охорона праці	Ст.викл. Ковтун А.І.		
2. Технології виготовлення	Доц. Корєньков В.М.		

7. Дата видачі завдання: 12.04.2023р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання дипломного проекту	Термін виконання етапів проекту	Примітка
1	Отримання завдання до дипломного проектування	12.04.2023-17.04.2023	
2	Дослідження та аналіз теоретичних відомостей щодо коливань рідини у резервуарів	17.04.2023-16.05.2023	
3	Моделювання та розробка демпферу коливань рідини	21.05.2023-31.05.2023	
4	Підготовка технічної документації та креслень проекту	01.06.2023-12.06.2023	
5	Виконання розділу «Охорона праці»	02.06.2023-06.06.2023	
6	Виконання розділу «Технології машинобудування»	07.06.2023-16.06.2023	

Студент _____ Владислав БАРДІН
(підпис) (прізвище, ім’я, батькові)

Керівник проєкту _____ Василь КОВАЛЬОВ
(підпис) (прізвище, ім’я, батькові)

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту

на тему: Демпфер коливань рідини у резервуарах

Київ – 2023 рік

АНОТАЦІЯ

Дана бакалаврська робота присвячена дослідженню явища коливань у рідини у резервуарах та розробці методів їх демпфування. Дослідження параметричних характеристик динамічної відповіді рухомих резервуарів, взаємодії між динамікою конструкції та рухом рідини усередині. Чисельне дослідження параметричних динамічних характеристик рухомих резервуарів методом довільних Лангранжево-Ейлерових скінченних елементів (ALE) та розробка на їх основі демпферів коливань рідини у резервуарі.

Ключові слова: коливання рідини, резервуар, демпфери коливань рідини, перегородка, метод Лагранжево-Ейлерових скінченних елементів, метод ALE, вплив потоку на перегородки.

ABSTACT

This bachelor’s thesis is dedicated to the study of oscillation phenomena in liquid-filled tanks and the development of methods for their damping. The research investigates the parametric characteristics of the dynamic response of moving tanks and the interaction between structural dynamics and the motion of the liquid inside. The numerical study of parametric dynamic characteristics of moving tanks is performed using the Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) finite element method and based on these results, damping devices for liquid oscillations in tanks are developed.

Keywords: fluid oscillations, reservoir, fluid vibration dampers, baffles, Langrangian-Eulerian finite element method, ALE method, flow influence on baffles.

ЗМІСТ

ВСТУП..... **9**

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ПРОБЛЕМАТИКИ УТВОРЕННЯ КОЛИВАНЬ РІДИНИ У РЕЗЕРВУАРАХ **10**

1.1.Види конструкцій та методів силового впливу на потоки рідини у резервуарах 13

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ALE ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ..... **22**

2.1. Загальні відомості та характеристики резервуарів циліндричної форми 22

2.2. Загальні відомості про довільний лагранжево-ейлерів метод (ALE) 24

2.3. Апроксимації скінченних елементів 28

2.4. Переміщення в методі ALE 32

2.5. Числова стійкість та збіжність 34

2.6. Висновок до розділу 2..... 35

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА СИМУЛЯЦІЯ ДЕМПФЕРІВ КОЛИВАНЬ РІДИНИ У РЕЗЕРВУАРІ..... **36**

3.1. Основні відомості та характеристики досліджуваного резервуара та демпферу 36

3.2. Дослідження та моделювання поведінки рідини у резервуарі 39

3.3. Висновок до розділу 3 49

РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ **50**

4.1. Порівняння отриманих даних для резервуарів без перегородок та з ними 50

4.2. Висновок до розділу 4..... 53

РОЗДІЛ 5. ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ПЕРЕГОРОДКИ..... **54**

5.1. Вибір матеріалу 54

5.2. Проектування технологічних послідовностей оброблення поверхонь 54

5.3. Проектування маршрутних технологічних процесів 56
5.4. Короткий опис вибору верстатного обладнання 57
5.5. Висновки до розділу 5 58
РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ **59**
6.1. Характеристики приміщення та майданчику для естакад 59
6.2. Освітлення 60
6.3. Пожежонебезпека 61
6.4. Вибухонебезпека 62
6.5. Забруднення токсичними речовинами та парами 62
6.6. Фактори шуму та вібрації 63
6.7. Висновки до розділу 6 64
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ **65**
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ **66**

ВСТУП

Незважаючи на постійний розвиток технологій та появи нових інженерних рішень в галузі трубопровідного транспортування, значна частина перевезень рідких вантажів все ще виконується за допомоги залізничних та автомобільних резервуарів – цистерн. Тому, інтенсивні перевезення різноманітних рідких матеріалів, починаючи від води та харчових продуктів, до палива та реагентів, стали причиною більш ретельного дослідження явищ коливань рідини у середині резервуарів та знаходженню методів боротьби з ними.

Вже як багато років, наукове та інженерне товариства вивчають явище замкненої течії в'язкої нестисливої рідини у частково заповнених резервуарах, що мають різну геометрію тіла. Такі рідини, під час транспортування, є джерелом нестійкості, оскільки під час переміщення цистерни рідина утворює течії з неконтрольованим плесканням. Це може призвести до резонансних силових впливів на стінки резервуара, а як наслідок – до утворення аварійних ситуацій.

Тому, встановлення внутрішніх демпфуючих перегородок у порожнині резервуара є одним із ефективних способів боротьби з коливаннями та контролю внутрішньої течії, дозволяють мінімізувати шкідливий вплив з боку рідини та розподілити напруження між утвореними областями. На сьогоднішній день, існує доволі достатня кількість варіантів встановлення даних перегородок у резервуарі: горизонтальні, вертикальні та під кутом до продовжної осі резервуара. Різними авторами запропоновані власні інженерні способи їх реалізації, однак, треба пам'ятати, що ідеального технічного рішення досі не існує.

МЕТА ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даної бакалаврської роботи є дослідження явища коливань рідини у резервуарах та розробка на основі теоретичних і практичних досліджень демпферу коливань рідини у резервуарі.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ПРОБЛЕМАТИКИ УТВОРЕННЯ КОЛИВАНЬ РІДИНИ У РЕЗЕРВУАРАХ

В стаціонарних та рухомих резервуарах рідини, динамічна відповідь структури залежить від руху рідини всередині. Таке явище відбувається тому, що два виділені динамічні режими, деформація структури та рух рідини виявляють сильний динамічний зв'язок. Тому, ретельний динамічний аналіз, що враховує повну взаємодію між двома динамічними середовищами, а також механічного пристрою для контролю руху рідини стає необхідною умовою для проектування резервуарів для рідин, що здатні забезпечити структурну стійкість.[1]

Рис. 1.1. Приклади резервуарів для зберігання та перевезення рідин.

Динамічна стійкість резервуарів, призначених для перевезення рідин, а також навантаження внаслідок гідродинамічного впливу рідини – актуальна проблема для кожного інженера. Це дуже складна математична проблема для аналітичного вирішення, оскільки динамічна гранична умова на вільній поверхні є нелінійною, а положення вільної поверхні змінюється з часом таким чином, що не відомо апріорі. Можна сказати, що аналітичні рішення процесу коливань рідини в резервуарі обмежені стандартними геометричними формами.

На Рис. 1.2., продемонстровані резервуари з різною геометрією, які використовуються для транспортування рідин.

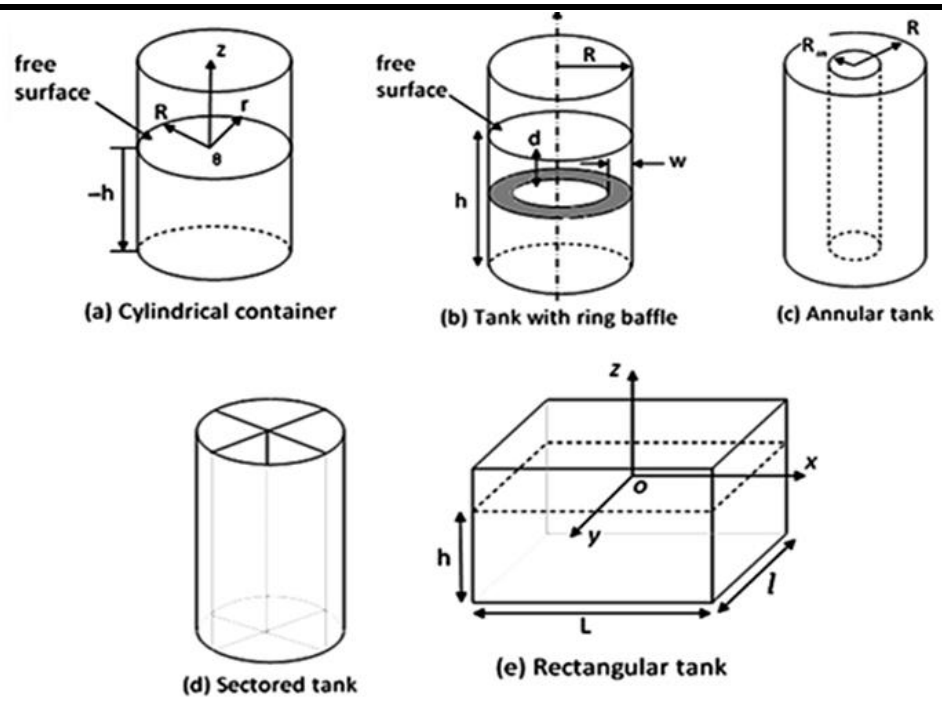


Рис. 1.2. Різновиди геометрії резервуарів

Існує велика кількість пасивних пристроїв для придушення коливань рідини і однією із них є класична перегородка, що поділяє резервуар на кілька частково відокремлених областей, що використовується у резервуарах для зберігання палива. Причина використання перегородок в інженерній справі доволі проста – вони є найбільш практичними та легко встановлюються всередині структури резервуару. Кількість перегородок, їх тип та відстань між ними, внутрішній діаметр отвору, через який проходить паливо, безпосередньо пов'язані з проектуванням перегородки з точки зору структурної, потокової і маневреної стійкості.

На Рис. 1.3. вказані деякі з найрозповсюджених типів демпферів коливань рідини. Основну класифікацію перегородок можна записати так:

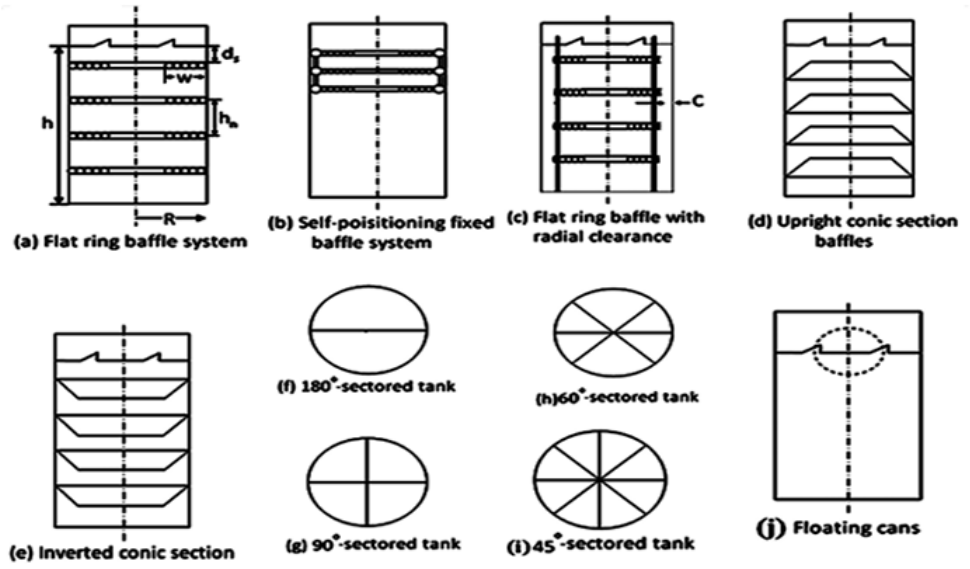


Рис. 1.3. Приклади демпфуючих пристроїв.

Варто відзначити, що використання внутрішніх демпфуючих пристроїв в першу чергу залежить від геометричних резервуарів, що містять рухому рідину. Як приклад, циліндричні резервуари зі співвідношенням діаметра до довжини 1:3, вказаних на Рис. 1.4., що рухається прямолінійно з певним прискоренням та гальмуванням, можна розмістити вертикальні перегородки для поділу маси рідини на окремі області [2]. В результаті такого технічного рішення, відбувається зменшення силового впливу на як стінки резервуара, так і на всю конструкцію загалом.

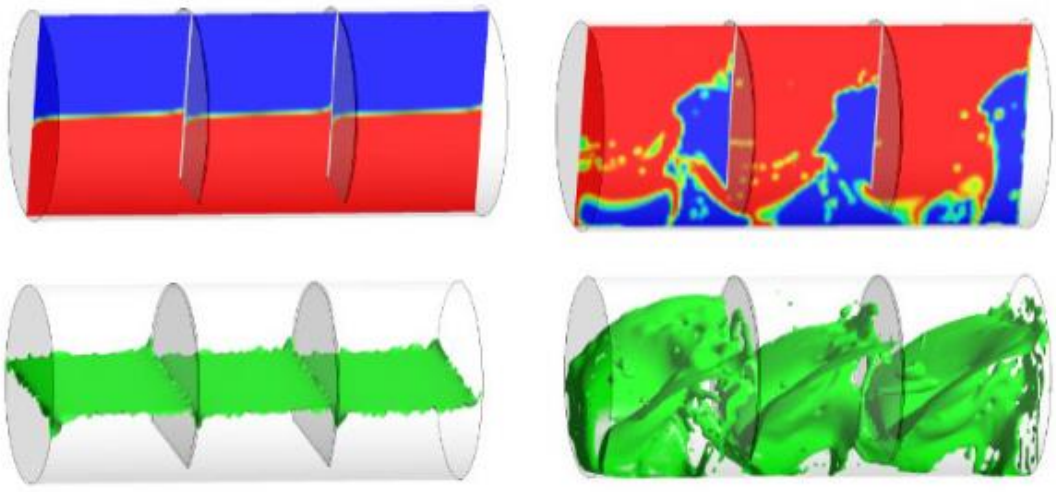


Рис. 1.4. Приклади результатів чисельного моделювання розподілу швидкостей при коливаннях рідини у циліндричному резервуарі з суцільними перегородками.

Також, для зменшення динамічного тиску в’язких течій усередині резервуара використовують круглі перегородки з центральним отвором (Рис. 1.5.), при

використанні яких упродовж прямолінійного прискорення руху частина рідини за дії сил інерції переливається до сусідніх секцій і таким чином зменшує піковий силовий вплив на площини перегородок [3]. Але треба зазначити, що в резервуарах, зі встановленими всередині круглими перегородками з центральним отвором, відбувається частковий перерозподіл сумарної маси потоку в резервуарі. Такі дослідження частот коливань рідини дозволяють створити трьохвимірну картину розвитку силових дій зі зміною часу, коли відбувається загасання інерційної течії у резервуарах.

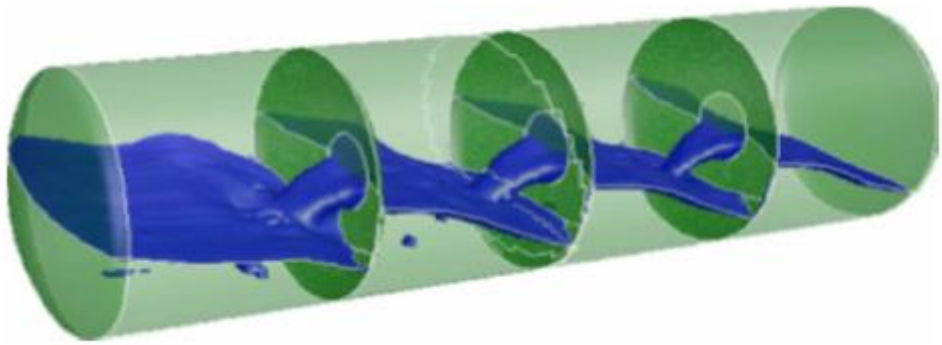


Рис. 1.5. Приклад результату чисельного моделювання розподілу швидкостей при коливаннях рідини у циліндричному резервуарі зі встановленими перегородками з центральними отворами.

1.1. Види конструкцій та методів силового впливу на потоки рідини у резервуарах

Дослідження, пов’язані з використанням внутрішньо-бакових демпферів мають розгалуження за декількома напрямами: по-перше, існує ціль охопити весь об’єм резервуара за допомоги встановлених перегородок, а по-друге, необхідно мінімізувати масу та габарити внутрішніх пристроїв. Тому, в сучасному світі, застосовуються різноманітні демпфери, що мають власні конструктивні особливості та конфігурації.

Наприклад, як вказано на Рис. 1.6., запропонований варіант Т-видного демпфуючого елементу, що встановлений в середовищі прямокутного баку. Особливістю даної перегородки є те, що вона формує вільну поверхню рідини при резонансному плесканні у коливальному потоці, де гребні вільної рідини становлять до 15% [4].

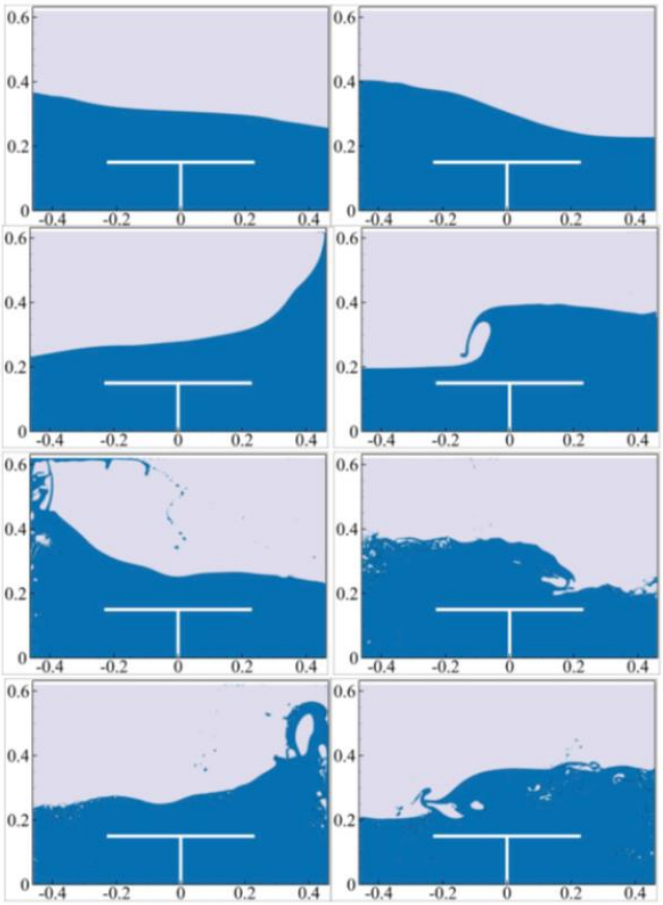


Рис. 1.6. Приклад застосування Т-видного придонного демпфуючого елементу при резонансних коливаннях рідини у прямокутному резервуарі.

Найбільш поширеним методом ефективного впливу на коливання внутрішніх потоків рідини можна вважати розташування горизонтальних перегородок різної ширини та конфігурацій на периферії резервуара, де і виникають максимальні градієнти полів швидкості та тисків.

На Рис. 1.7. вказані результати математичного моделювання внутрішніх резонансних течій у резервуарі прямокутного переріз, де спостерігаємо утворення дрібних циркуляційних течій, що можуть виникати поблизу перегородок та мігрувати в усьому просторі баку [5].

Тому, можна сказати, що циркуляційні маломасштабні утворення хоч і не впливають на величину кругового збурюючого моменту, але вони приймають участь у формуванні стійкості інерційної течії поблизу вільної поверхні рідини. Циркуляційна течія поглинає частину кінетичної енергії потоку, зменшуючи плескання вільної поверхні рідини.

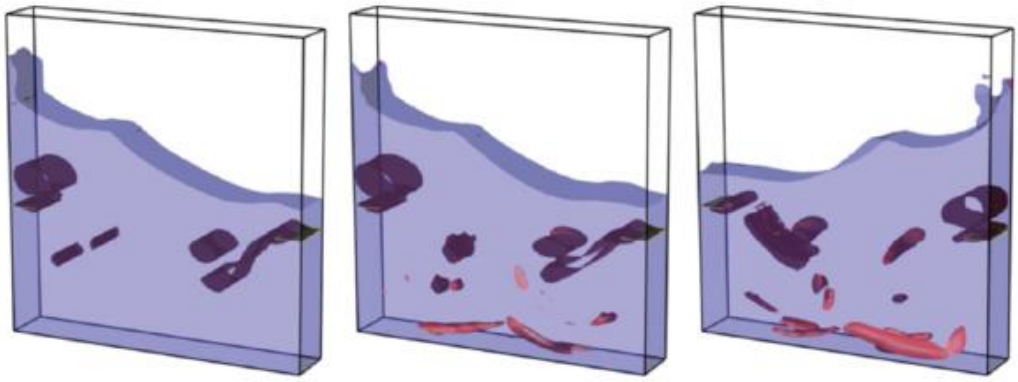


Рис. 1.7. Вплив дрібних циркуляційних течій в околі периферійних перегородок на формування збуджень на вільній поверхні у прямокутному резервуарі.

Як результат, головною сучасною тенденцією в розробці та конструюванні внутрішніх демпфуючих елементів у резервуарів з в'язкою рідиною є створення конструкції з отворами на площинах перегородок. Це надає значних конструкційних покращень, таких як зменшення маси, створення додаткових гідравлічних опорів для інерційного потоку, забезпечує радикальних перерозподіл гідродинамічних полів (компонент вектора швидкості та тисків).

На Рис. 1.8. представлена характерна для замкнених течій конструкція проникного демпфуючого пристрою з прямокутними вікнами, а також заглибленими горизонтальними перегородками. Порівнюючи результати моделювання резервуара без перегородок (Рис. 1.8., а) та резервуара зі встановленими перегородками (Рис. 1.8., б), можна спостерігати, що наявність перегородок здатна утримувати досить велику кількість рідини у стабілізованому стані без можливості утворення резонансних плескань [6].

Але з іншого боку, наявність громіздких та масивних конструкцій напрямних апаратів резервуарів та баків рухомих об'єктів з рідиною є досить ризикованим через суттєве через суттєві обмеження при маневруванні об'єкта. Тому, перфорація площини перегородки отворами дозволяє створювати дещо іншу ситуацію з точки зору динамічного тиску. У порівнянні з динамічним впливом потоку на суцільну перегородку, інерційні течії частково проникають через отвори перфорації, значно зменшуючи сумарний тиск на площині перегородки.

Також, як було вказано вище, перфоровані плоскі перегородки з різними ступенями проникності є досить ефективними для боротьби з коливаннями рідини у резервуарах. Проникність площин подібних перегородок створює певний

гідравлічних опір для потоків, ефективно долаючи резонансні плескання рідини, що вказано на Рис. 1.9. [7].

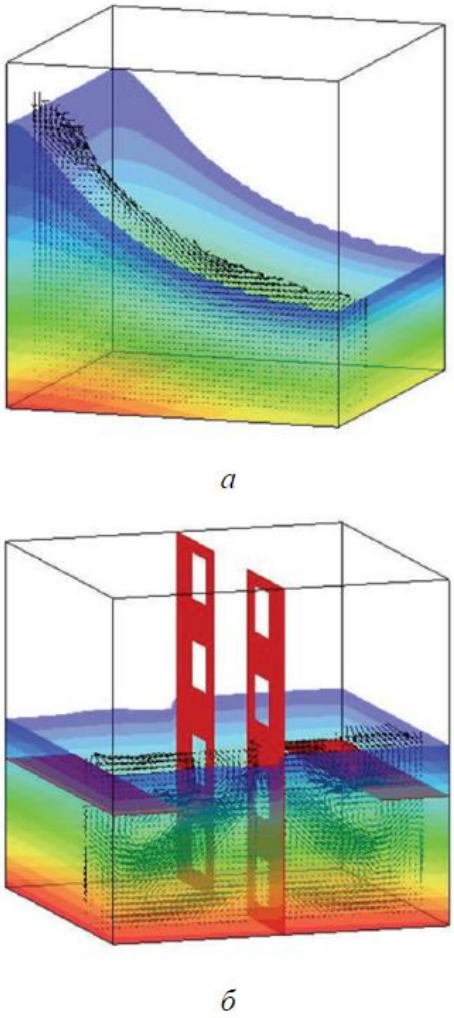


Рис. 1.8. Результати застосування вертикальних перфорованих жорстких перегородок та периферійних горизонтальних конструкцій.

Окрім заощадження маси подібних конструкцій через наявність отворів упродовж усієї площини перегородки та демпфування силових впливів завдяки її проникності перегородки являються собою ребра жорсткості для забезпечення міцності усієї конструкції резервуара. Перспективами широкого застосування подібних жорстких конструкцій є застосування гнучких комплексних пристроїв, що здатні поглинати кінетичну енергію потоку завдяки деформації площини самої перегородки.

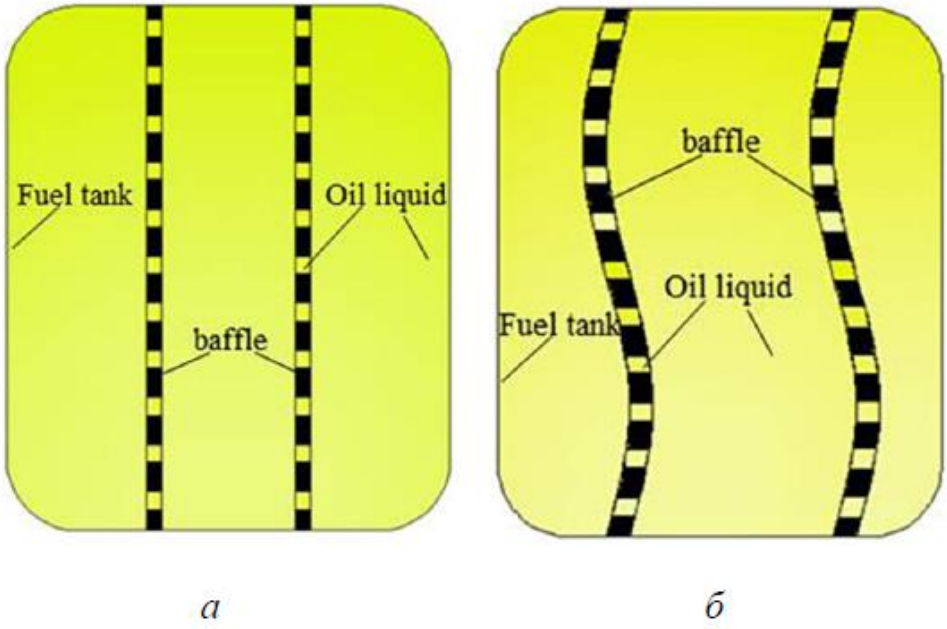


Рис. 1.9. Схематичні зображення перерізів перфорованих напрямних апаратів у паливному резервуарі: прямолінійні перегородки (а) та синусоїдальні перегородки (б).

Окрім заощадження маси подібних конструкцій через наявність отворів упродовж усієї площини перегородки та демпфування силових впливів завдяки її проникності перегородки являються собою ребра жорсткості для забезпечення міцності усієї конструкції резервуара. Перспективами широкого застосування подібних жорстких конструкцій є застосування гнучких комплексних пристроїв, що здатні поглинати кінетичну енергію потоку завдяки деформації площини самої перегородки.

При цьому, треба зазначити, що гнучка перегородка може значно зменшити уданий вплив рідини на стінці резервуара, як це вказано на Рис. 1.10. За рахунок своєї деформації вона поглинає частину енергії плескання рідини, що, як результат, зменшує силові навантаження на конструкцію перегородки [8].

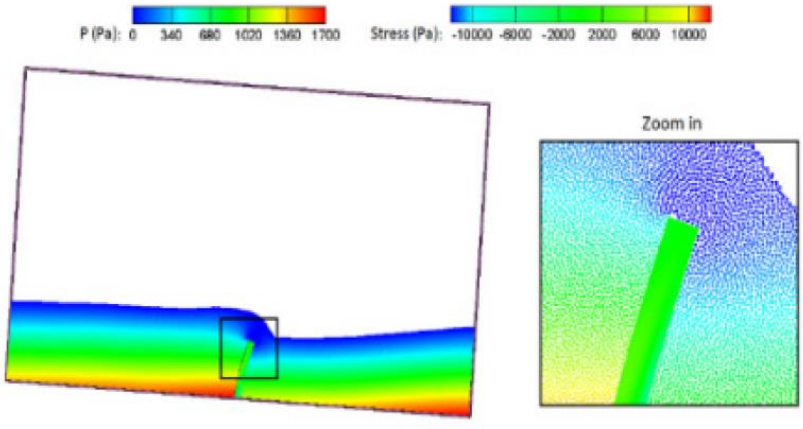


Рис. 1.10. Поле тиску рідини та напружень пружної перегородки

Вже на наступному Рис. 1.11. показана величина ударного тиску, визначена на стінці резервуара при різних її модулях пружності. Така сама структура перегородки також впливає на її демпфіруючу здатність до плескання через зміну жорсткості [8].

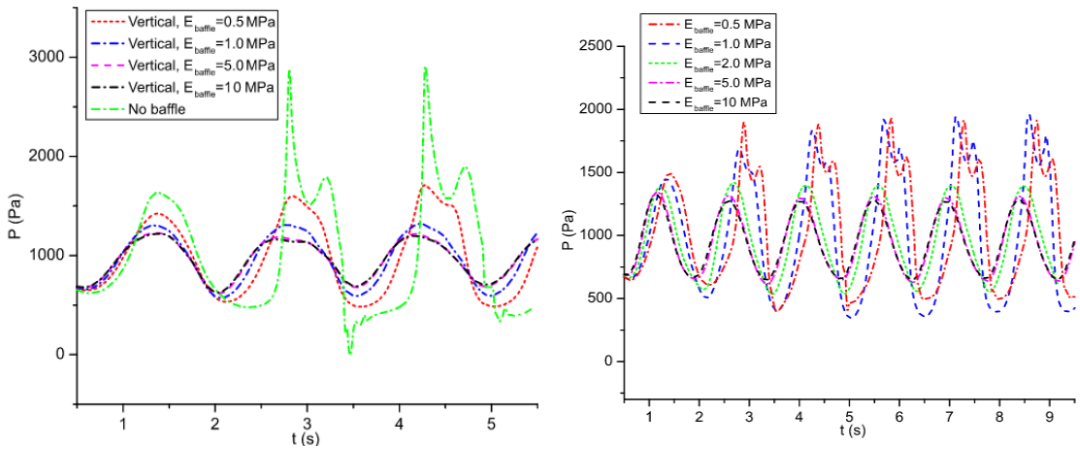


Рис. 1.11. Залежність за часом тиску на стінки резервуару при плесканні рідини з різною пружністю перегородки.

Таким чином, за допомоги гнучкості перегородок, ступенем їх проникності та розташуванням у резервуарах можна запропонувати досить ефективні засоби керування внутрішніми інерційними потоками в'язкої рідини.

Також, треба зазначити, що одним із ефективних варіантів методів впливу на внутрішні резонансні течії в резервуарах є використання рухомих демпферів, які можуть змінювати своє положення під дією рідини, створюючи гідравлічний опір потоку, а також поглинають частину енергії потоку рідини. Прикладом даного конструкційного рішення, що вказаний на Рис. 1.12, є плаваюча платформа, що здатна реагувати на дію зовнішніх сил рідини [7].

Окрім функції ізолювання газової та рідкої фаз у резервуарі, така платформа має позитивну плавучість, може змінювати свої положення відповідно силовим впливам з боку рідини, виключаючи утворення резонансного плескання.

Також, у якості плаваючих перегородок використовуються конструкції з певним зазором між стінками резервуара та зовнішніми кромками напрямного апарату, що вказано на Рис. 1.13. Як можна побачити, будь-яка динаміка вільної поверхні рідини при коливаннях у резервуарі, включаючи резонансні плескання, відстежуються плавучою пластиною, яка змінювати кут її площини відносно горизонтальної поверхні [8].

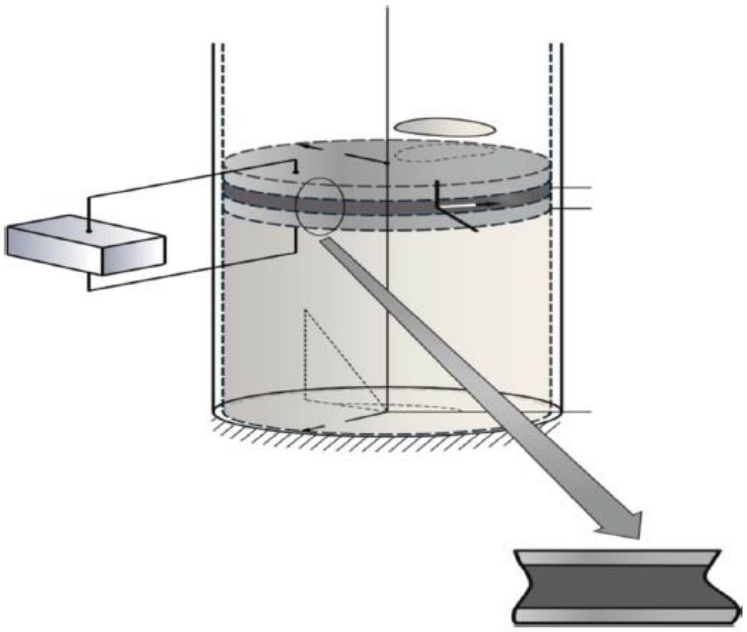


Рис. 1.12. Плаваюча платформа для поглинання коливань поверхні рідини у циліндрі.

Але і даний варіант реалізації пристроїв демпфування має свої недоліки. Так, як маса подібної плаваючої платформи може складати досить велику величину, то її лінійне переміщення навіть на незначну відстань або кут може віднімати частину кінетичної енергії інерційного потоку в'язкої рідини. Також, ще одним із недоліків такої конструкції є те, що вони можуть здійснювати неконтрольовані рухи у різних площинах резервуара, а також вони нечутливі до зміни рівня наповнення баку.

А тому, інженерним товариством було запропоновано новий метод рішення проблеми демпфування рідини у резервуарах – поєднання переваг фіксованих та плаваючих перегородок, що дає реалізувати нову плаваючу комірчасту конструкцію, як вказано на Рис. 1.14. [9].

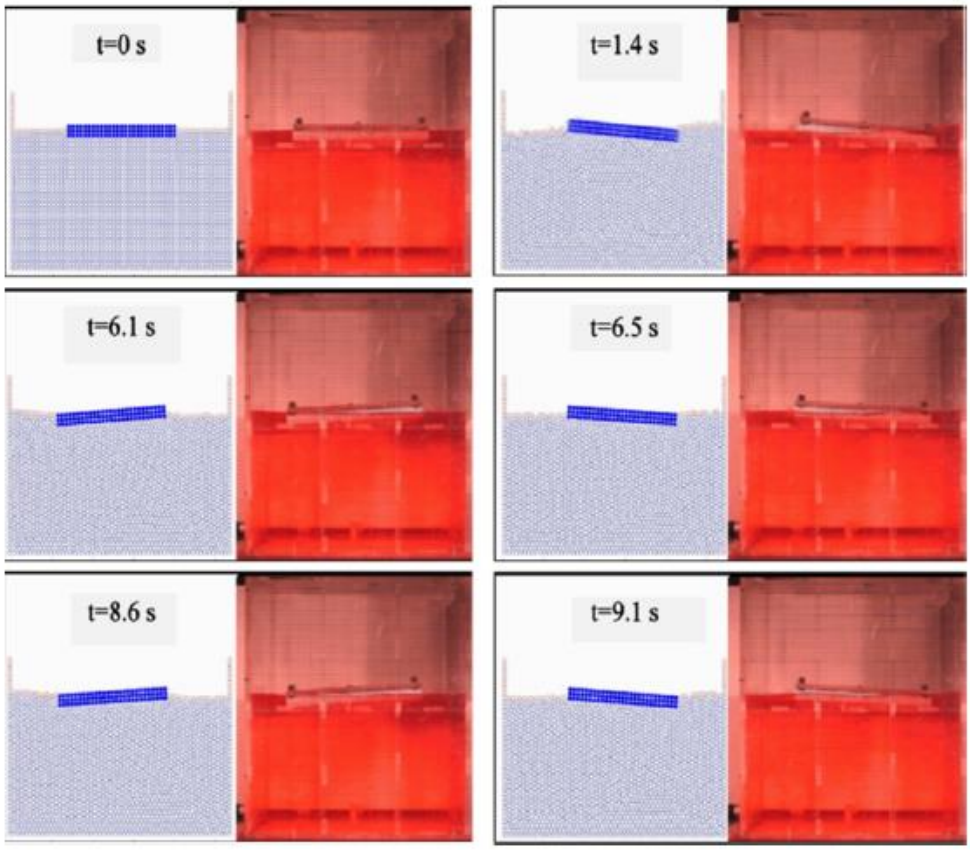


Рис. 1.13. Порівняння геометрії вільної поверхні рідини за результатами чисельного та фізичного випробування.

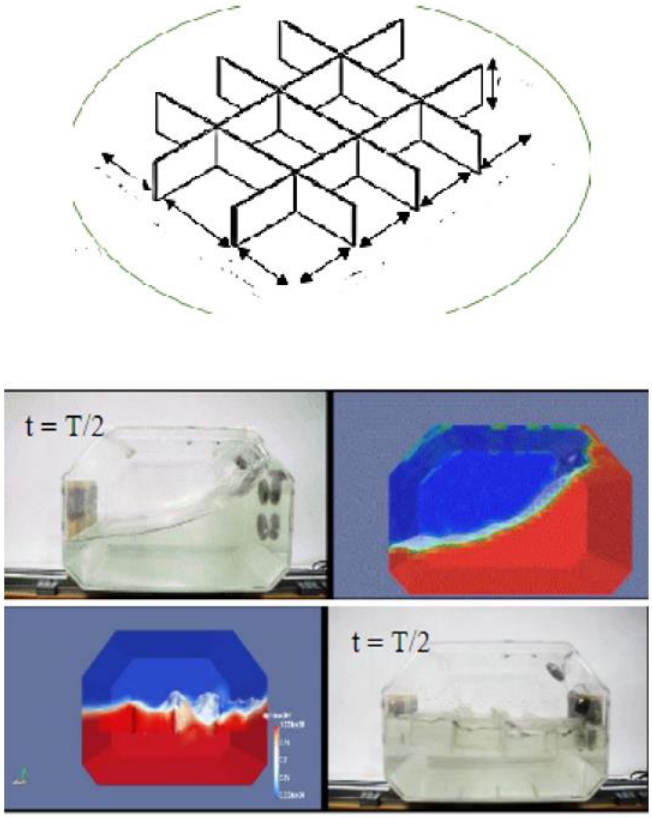


Рис. 1.14. Конструкція плаваючої комірчастої перегородки та положення рідини у резервуарі з перегородкою та без неї

Тому, завдяки наявності плаваючих елементів перегородок, рідина в резервуарі поділяється на менші робочі об’єми з більш розсіяною структурою потоку. Таким чином, плескання вільної поверхні потоку суттєво знижується, а ударних тиск на стінки бака зменшується.

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ALE ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ

Даний розділ присвячено теоретичному обґрунтуванню необхідності використати довільний лагранжево-ейлерів метод (метод ALE) для подальшого дослідження впливу демпфуючих елементів усередині резервуара циліндричної форми.

2.1. Загальні відомості та характеристики резервуарів циліндричної форми

Розглянемо у якості резервуара цистерну циліндричної форми, що є найбільш розповсюдженою [10]. На Рис. 2.1. вказані геометричні параметри циліндричного резервуара з рівномірною товщиною стінок t, металічною перегородкою з товщиною t_B та внутрішнім діаметром отвору D_B, в якому знаходиться непроникне в'язке паливо, заповнене до висоти H_B.

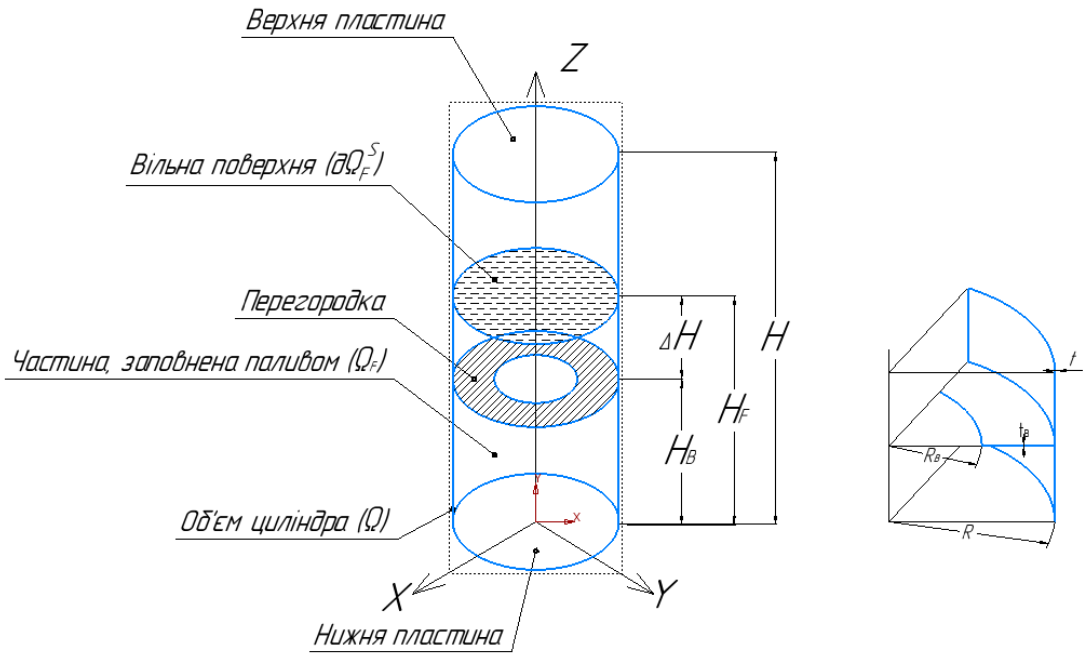


Рис 2.1. Визначення геометрії та символів циліндричного паливного резервуара зі встановленою перегородкою.

Треба зазначити, що динамічний відгук структури резервуарів характеризується кількістю і розташуванням перегородок, внутрішнім діаметром отвору, відстанню між перегородками, товщиною перегородки, тощо.

В декартовій системі координат, динамічний рух структури резервуара, що займає просторову область, визначається згідно с цим рівнянням:

$$\sigma_{ij}(u)_{,j} - c\frac{\partial u_i}{\partial t} = \rho\left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} - g_i\right) \quad in\ \Omega \times (0,T] \quad (1)$$

З початковими та граничними умовами:

$$u_i(0) = \dot{u}_i(0) = 0 \ \ in\, \Omega \ \ (2)$$

$$u_i = \hat{u}_i \ \ on\, \partial\Omega_D \ \times \ (0,T] \ \ (3)$$

$$\sigma_{ij} n_j \ = \ t_i \ \ on\, \partial\Omega_I \ \times \ (0,T] \ \ (4)$$

Де c, ρ, та g_i позначають коефіцієнт демпфування, щільність структури та компонент прискорення вільного падіння відповідно. $\partial\Omega_D$ – границя переміщення, $\partial\Omega_I$ – загальний інтерфейс між паливом та конструкцією. У більшості випадків поверхневий вплив визначається за формулою $t_i n_i \ = \ -p$, де p – гідродинамічний тиск палива. З іншої сторони, зовнішній вплив зазвичай є збудженням типу прискорення.

Нестаціонарний, неусталений в'язкий перебіг внутрішнього непроникного палива, що займає просторову область $\Omega_F(t)$, що змінюється с плином часу та характеризується законами збереження маси та імпульсу:

$$v_{i,j} = 0 \ \ in\, \Omega_F \ \times \ (0,T] \ \ (5)$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j v_{i,j} \ - \ \frac{1}{\rho_F} \tau_{ij,j} = g_i \ \ in\, \Omega_F \ \times \ (0,T] \ \ (6)$$

Де v_i та ρ_F позначають компоненти швидкості течії та щільності палива відповідно. Позначаючи кінематичну в'язкість палива як μ, тензор напружень τ_{ij} знаходиться таким чином:

$$\tau_{ij} = \mu(v_{i,j} \ + \ v_{j,i}) \ - \ \rho\delta_{ij} \ \ (7)$$

Границя $\partial\Omega_F(t)$, що змінюється з часом, складається із вільної поверхні $\partial\Omega_F^S$ та інтерфейс паливної структури $\partial\Omega_I$ так, що $\partial\Omega_F \ = \ \overline{\partial\Omega_F^S \cup \partial\Omega_I}$. Тоді, рівняння імпульсу (7) має бути записано з початковою умовою:

$$v_i(x,0) \ = \ 0 \ \ in\, \Omega_F \ \ (8)$$

А граничні умови будуть задані таким чином:

$$v_i = \frac{\partial u_i}{\partial t} \ \ on\, \partial\Omega_I \ \times \ (0,T] \ \ (9)$$

$$\tau_{ij} n_j \ = \ \hat{t}_i \ \ on\, \partial\Omega_F^S \ \times \ (0,T] \ \ (10)$$

Де $\hat{t}_i$ – компоненти тертя, що діють на вільній поверхні палива. Гранична умова швидкості (9) вказує на відсутність ковзання та проникнення, однак перша умова зникає, коли перебіг рідини передбачається нев'язким.

2.2. Загальні відомості про довільний лагранжево-ейлерів метод (ALE).

Чисельний підхід до завдань за початково-граничними умовами, що включають області та границі, як вільні поверхні, взаємодія між структурами, завдання з великими деформаціями та границями, що рухаються, представляють собою серйозні проблеми в обчислювальній механіці. Як відомо, існують три основних підходи до чисельної реалізації таких завдань: метод Лагранжа, метод Ейлера та довільний лагранжево-ейлерів метод (або метод ALE).

При використанні чисельного підходу Лагранжа, границя, що змінюється із часом, точно зміщується зі швидкістю матеріальної частки, а тому границя обновлюється. Однак, такий рух призводить до надмірної деформації всієї сітки. В результаті успішне та ефективне чисельне рішення потребує послідовної перебудови сітки до кінцевого часового етапу.

У методі Лагранжа, вказаному на Рис. 2.2., початкова конфігурація співпадає з матеріальною конфігурацією. Матриця скінченних елементів розташована в матеріальній конфігурації і точка m на сітці ідентична положенню матеріальної точки P в матеріальній конфігурації, позначеної як X. Припустимо, що ми маємо матеріальні лінії, що на Рис. 2.2. вказано пунктирною лінією, на матеріальному тілі, які співпадають з матрицею скінченних елементів, розташованою в матеріальній конфігурації [11].

Оскільки кругла пластина деформується в еліптичну форму, ці матеріальні лінії також деформуються, і, як результат, отримаємо просторове положення x матеріальної точки. Видно, що відбуваються великі деформації матеріальних ліній та оскільки рух сітки ідентичний фізичному руху, що призводить до утворення деформованих матеріальних ліній. Також, виникають спотворені елементи, що є головним недоліком вирішення поставлених задач за допомоги методу Лагранжа.

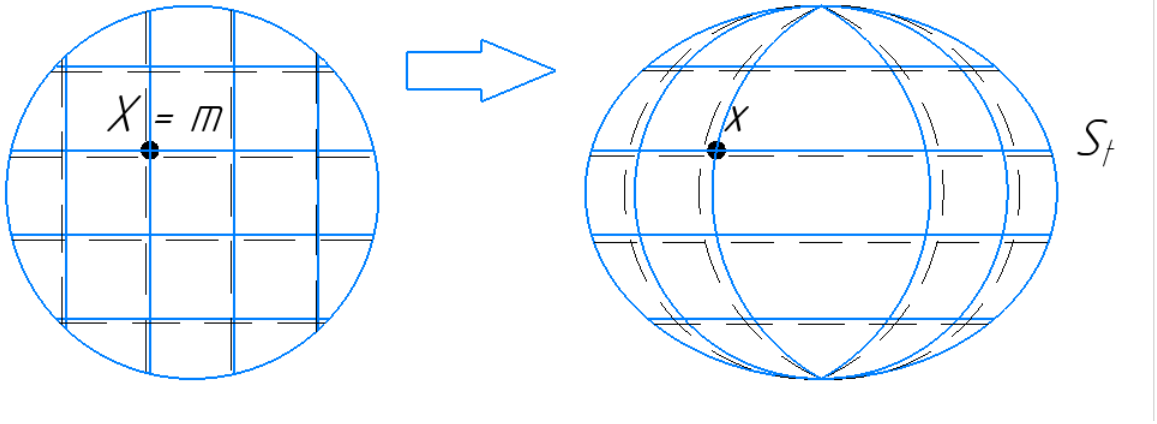


Рис. 2.2. Метод Лагранжа.

А з іншого боку, метод Ейлера розглядає область сітки, яка є просторово фіксованою та більшою, ніж фактична матеріальна область. Рухому границю потрібно локально визначити за допомогою відповідної характеристичної функції, такою як функція об'ємної частки матеріалу, що описує матеріальні та вільні області. Однак, необхідно локально уточнювати сітку, щоб визначити межу інтерфейсу.

Розглядаючи більш детально метод Ейлера, як вказано на Рис. 2.3., початкова конфігурація позначена просторовою конфігурацією. Таким чином, матриця скінчених елементів розташована в просторовій конфігурацій і точка m співпадає з положенням матеріальної точки P в просторовій конфігурації, що позначена як x. Будуємо матеріальні лінії на матеріальному тілі, але тепер в просторовій конфігурації [11,12].

Для того, щоб отримати саме ці лінії в просторовій конфігурації, можна очікувати, що ці лінії в просторовій конфігурації, як продемонстровано на лівій частині Рис. 1.16. Можна спостерігати, що добре розподілені елементи, обрані як початкова конфігурація, залишаються на своєму місці, оскільки матриця скінченних елементів зафіксована у просторі.

Але й метод Ейлера має свій недолік. Він полягає в тому, що граничні вузли не залишатимуться на границі, якщо пластина буде розтягнута, оскільки для наступного кроку часу використовується та сама початкова конфігурація, тоді як деформується і стає більш еліптичною.

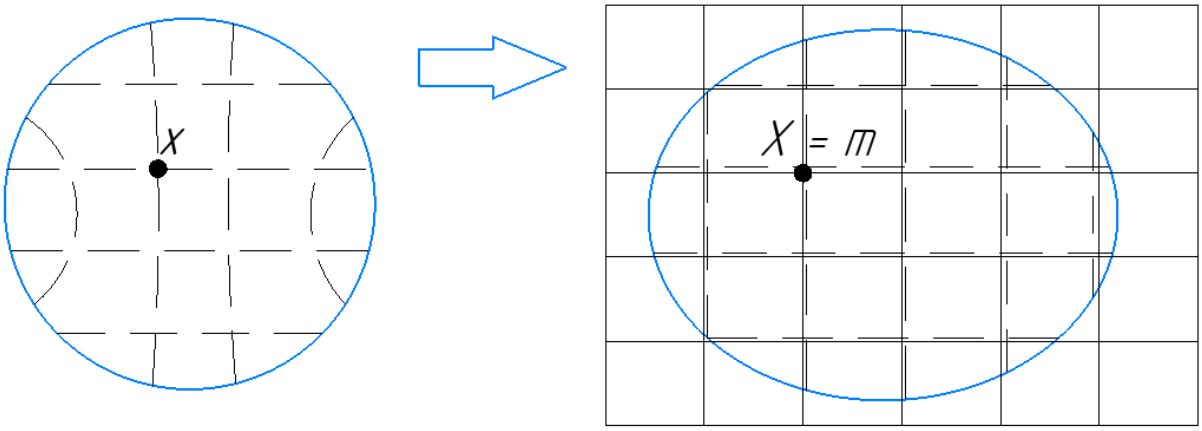


Рис. 2.3. Метод Ейлера.

Метод ALE був розроблений для використання обчислювальних переваг двох попередніх методів. Згідно с ним, розглядається область сітки, ідентична матеріальній області, тому її границя відстежує швидкість матеріалу, при цьому сітка залишається досить постійною. Як відомо, метод скінченних елементів використовує лагранжеву (або матеріальну) та ейлереву (або просторову) області, а також довільну референтну область. Зазвичай, вона визначається доменом обчислювальної сітки [13, 14, 15].

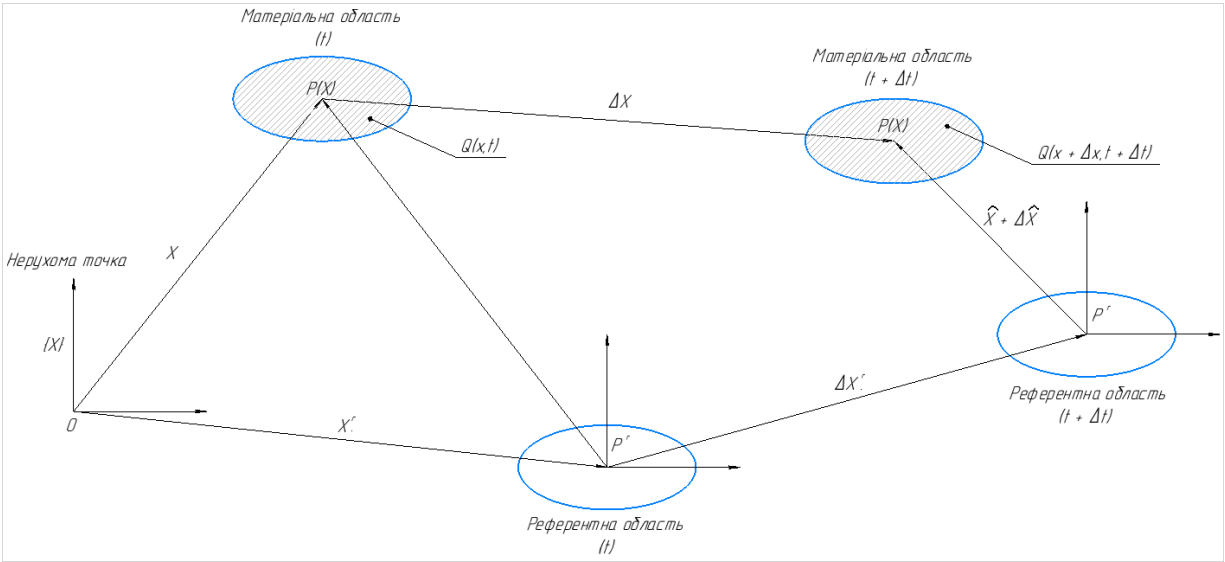


Рис. 2.4. Зображення матеріальної, просторової та референційних областей

Згідно з Рис. 2.4., розглянемо матеріальну та референціальну області у момент часу *t*, де будь-яка матеріальна частка, що рухається зі швидкістю V, позначається як P. Потім, вводимо фіксовану Декартову систему координат {X} разом із одиничним вектором e_i, і тоді матеріальна частинка P ідентифікується лагранжовими координатами X. Крім того, передбачається, що точка P^r, розташована на позиції x^r в референційній області в момент часу *t* та рухається зі

швидкістю $\hat{V}$, до якої ми додаємо до рухомої Декартової системи координат $\{X^r\}$ з одиничним векторами $\hat{e}_i$. Тоді, просторове становище тієї ж матеріальної частинки P в момент часу t може бути виражено наступним чином: або $x = x_i e_i$ у першій системі координат, або $\hat{x} = \hat{x_i}\hat{e_i}$ у другій системі.

Припустимо, що матеріальна частинка P та референціальна система координат $\{X^r\}$ пересувається до нових позицій $x = \Delta x$ та $x^r = \Delta x^r$, з абсолютними швидкостями V та $\hat{V}$ протягом часу Δt. Тоді виконуються наступні співвідношення:

$$\hat{x} = x - x^r \quad (11)$$

$$\hat{x} + \Delta\hat{x} = (x + \Delta x) - (x^r + \Delta x^r) \quad (12)$$

Використовуючи співвідношення $\Delta x = V \cdot \Delta t$ та $\Delta x^r = \hat{V} \cdot \Delta t$, отримаємо:

$$\Delta\hat{x} = (V - \hat{V}) \cdot \Delta t \quad (13)$$

Зараз позначимо Q(x, t) як величину потоку с позицією x в момент часу t, тоді вона може бути відображена в системі координат $\{X^r\}$: $Q(x,t) = Q\{x(\hat{x}), t\} = \hat{Q}(\hat{x}, t)$ відповідно до перетворення координат. Рухома матеріальна частинка, що знаходиться там, буде мати значення Q(x, t) в момент часу t та $Q(x + \Delta x, t + \Delta t)$ в новій позиції $x + \Delta x$ протягом короткого часового інтервалу t вздовж шляху потоку.

Тоді матеріальна (або суттєва) похідна DQ/Dt величини Q, що слідує за матеріальною частинкою P, відносно референційної системи координат $\{X^r\}$, визначається наступним чином:

$$\frac{DQ}{Dt}\Big|_{(X,t)} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\hat{Q}(\hat{x}+\Delta\hat{x}, t+\Delta t) - \hat{Q}(\hat{x}, t)}{\Delta t} \quad (14)$$

Згідно за формулою ряду Тейлора для функції двох змінних маємо:

$$\frac{DQ}{Dt}\Big|_{(X,t)} = \frac{\partial\hat{Q}}{\partial t}\Big|_{(\hat{X},t)} + s \cdot \frac{\partial\hat{Q}}{\partial\hat{x}}\Big|_{(\hat{X},t)} = \frac{\partial Q}{\partial t}\Big|_{(X,t)} + s \cdot \frac{\partial Q}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial\hat{x}}\Big|_{(X,t)} \quad (15)$$

Де $s = \left(V - \hat{V}\right)$ визначається як відносна (або конвективна) швидкість між матеріальною та референтною швидкостями.

Порівнюючи рівняння (15) зі стандартними рівнянням Ейлера, можна помітити, що відмінність полягає лише в конвективній похідній, останньому доданку в правій частині виразу. Таким чином, рівняння Нав'є-Стокса у методі скінченних елементів можна записати наступним чином:

$$v_{i,j} = 0 \quad in\,\Omega_F \times (0,T] \quad (26)$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + \left(v_j - \widehat{v_j}\right) \cdot v_{i,j} - \frac{1}{\rho_F} \cdot \tau_{ij,j} = g_i \quad in\,\Omega_F \times (0,T] \quad (27)$$

Без зміни в конститутивному співвідношенні (7) та початкових і граничних умовах (8) – (9).

Зі співвідношення між матеріальними та референтними похідними мі розуміємо, що опис метода ALE може бути використаний як метод Лагранжа, переміщуючи $\{X^r\}$ зі швидкістю матеріалу (тобто $V = \hat{V}$), або як метод Ейлера, закріплюючи $\{X^r\}$ у просторі (тобто $\hat{V} = 0$).

На практиці, рух референтної області може бути довільним у будь-якому місці у просторі та моменті часу, в залежності від чисельного моделювання [16]. Це значить, що всі три методи можуть бути ефективно використані в межах одного аналізу з відповідним керуванням руху сітки.

2.3. Апроксимація скінченних елементів

Згідно принципу можливих переміщень, ми можемо отримати наближену форму рівняння (1), в якому вводиться ізопараметричне приближення завдяки методові скінченних елементів для динамічного зміщення u(x,t):

$$u(x,t) = \Phi(x) \cdot \bar{u}(t) \quad (18)$$

Де матриця Ф розмірності (3×3N) складається з N базисних функцій. Тоді ми отримуємо звичайну чисельну систему рівнянь, яка представлена наступним чином:

$$\boldsymbol{M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = f} \quad (19)$$

Де вектор навантаження $\boldsymbol{f}$ обумовлений силою тіла та гідродинамічним тиском.

Далі, проводиться часова дискретизація рівняння (19) з використанням метода Ньюмарка зі сталим усередненим прискоренням [17]:

$$\boldsymbol{M\ddot{u}^{n+1} + C\dot{u}^{n+1} + Ku^{n+1} = f^{n+1}} \quad (20)$$

Звідки:

$$\boldsymbol{\dot{u}^{n+1} = \dot{u}^n + \Delta t \cdot (\ddot{u}^{n+1} + \ddot{u}^n)/2} \quad (21)$$

$$\bar{\boldsymbol{u}}^{n+1} = \bar{\boldsymbol{u}}^{n} + \Delta t \cdot \dot{\bar{\boldsymbol{u}}}^{n} + (\Delta t)^{2}\left[\left(\frac{1}{2} - \beta\right)\ddot{\bar{\boldsymbol{u}}}^{n} + \beta\ddot{\bar{\boldsymbol{u}}}^{n+1}\right] \quad (22)$$

Де параметр β відповідає значенню 0.25 [17]. Підставляючи рівняння (21) та (22) до рівняння (20), отримаємо:

$$\left[\boldsymbol{M} + \frac{\Delta t}{2}\boldsymbol{C} + \beta(\Delta t)^{2}\boldsymbol{K}\right]\ddot{\bar{\boldsymbol{u}}}^{n+1} = -\left[\frac{\Delta t}{2}\boldsymbol{C} + \left(\frac{1}{2} - \beta\right)(\Delta t)^{2}\boldsymbol{K}\right]\ddot{\bar{\boldsymbol{u}}}^{n} -$$

$$[\boldsymbol{C} + \Delta t \cdot \boldsymbol{K}]\dot{\bar{\boldsymbol{u}}}^{n} - \boldsymbol{K}\bar{\boldsymbol{u}}^{n} + \boldsymbol{f}^{n+1} \quad (23)$$

Варто зазначити, що вектор навантаження $\boldsymbol{f}^{n+1}$ на крок часу (n + 1) обчислюється за даною формулою:

$$\boldsymbol{f}^{n+1} = \boldsymbol{f}^{n} + \int_{\partial\boldsymbol{\Omega}_{\boldsymbol{I}}} \Phi^{T}(p^{n} - p^{n-1})ds \quad (24)$$

Де p позначає кінцево-елементну апроксимацію гідростатичного тиску, отриману з систем рівнянь Нав'є-Стокса (16) та (17).

Згідно зі схемою Кранка-Ніколсона, разом із довільністю швидкості сітки, рівняння Нав'є-Стокса (16) та (17), що було описано в методі ALE, можна дискретизувати наступним чином:

$$\frac{v_i^{n+1} - v_i^{n}}{\Delta t} + \left(v_j^{*} - \hat{v}_j^{n}\right)v_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \frac{1}{p_F}\tau_{ij,j}^{n+\frac{1}{2}} = g_i \quad (25)$$

$$v_{i,i}^{n+1} = 0 \quad (26)$$

Звідки:

$$\tau_{ij,j}^{n+\frac{1}{2}} = \mu v_{i,jj}^{n+\frac{1}{2}} - p_i^{n+\frac{1}{2}} \quad (27)$$

$$v_i^{*} = v_i^{n+1/2} = (3v_i^{n} - v_i^{n-1})/2 \quad (28)$$

Для ефективного розв'язання тисків та швидкостей на кожному кроці часу, що задовольняють умову неперервності (36) використовують фракційний метод [18]. У звичайних фракційних методах, що випливають з методу Чорина [19], градієнт тиску у рівнянні (25) роз'єднується від конвекційних, дифузійних та зовнішніх навантажень, шляхом введення проміжної швидкості, яка не задовольняє умову неперервності. Тому на наступному кроці вона повинна бути скоригована тиском, отриманим з рівняння неперервності. Хоча цю процедуру корекції можна поліпшити за допомогою відомого алгоритму типу Чорина SIMPLE [20], вона потребує більшої кількості чисельних ітерацій для збіжності швидкості порівняно зі звичайним методом фракційних кроків.

Використовуючи основне співвідношення та рівняння (25), разом із співвідношенням (27), можна записати доданок конвекції наступним чином:

$$\left(v_j^* - \hat{v}_j^n\right) v_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = \left(v_j^* - \hat{v}_j^n\right)\left[v_{i,j}^n + \frac{(v_i^{n+1} - v_i^n)_{,j}}{2}\right] =$$

$$= \left(v_j^* - \hat{v}_j^n\right) v_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{2}\left(v_j^* - \hat{v}_j^n\right)\left[\left(v_k^* - \hat{v}_k^n\right) v_{i,k}^{n+\frac{1}{2}} + \frac{1}{p_F} p_i^{n+\frac{1}{2}} - \frac{1}{p_F}\mu v_{i,kk}^{n+\frac{1}{2}} - g_i\right]_j =$$

$$= \left(v_j^* - \hat{v}_j^n\right) v_{i,j}^n - \frac{\Delta t}{2}\left(v_j^* - \hat{v}_j^n\right)\Lambda_{i,j}^{n+1/2} \quad (29)$$

Де $\Lambda_i^{n+1/2}$ і відноситься до терміну $[\cdot]$. Підстановка вищезазначеного співвідношення в рівняння (25) призводить до рівнянь швидкості на кожному моменті часу:

$$\frac{v_i^{n+1} - v_i^n}{\Delta t} + \left(v_j^* - \hat{v}_j^n\right) v_{i,j}^n + \frac{\mu}{p_F} v_{i,jj}^{n+\frac{1}{2}} - \frac{\Delta t}{2}\left(v_j^* - \hat{v}_j^n\right)\Lambda_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = g_i \quad (30)$$

З початковою умовою (8):

$$v_i^{n+\frac{1}{2}} = \frac{\partial u_i^{n+\frac{1}{2}}}{\partial t} \quad on\ \partial\Omega_I \quad (31)$$

$$\tau_{ij}^{n+\frac{1}{2}} n_j = \hat{t}_i^{n+1/2} \quad on\ \partial\Omega_F^S \quad (32)$$

Потім, ми беремо дивергенцію рівняння (25) та застосовуємо умову неперервності (36). Тоді ми можемо отримати рівняння для тиску:

$$\frac{1}{p_F} p_{ii}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{\Delta t} v_{i,i}^n - \left[\left(v_j^* - \hat{v}_j^n\right) v_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \frac{\mu}{p_F} v_{i,jj}^{n+\frac{1}{2}} - g_i\right]_{,i} \quad (33)$$

З початковою умовою (8) та граничними умовами для тиску, заданих в цих рівняннях:

$$p^{n+1/2} = 0 \quad on\ \partial\Omega_F^S \quad (34)$$

$$p_i^{n+1/2} n_i = -\frac{p_F}{\Delta t}\left(\frac{\partial u_i^{n+1}}{\partial t} - \frac{\partial u_i^n}{\partial t}\right) n_i = \gamma^{n+\frac{1}{2}} \quad on\ \partial\Omega_I \quad (35)$$

Варіаційні форми, що відповідають вищевказаним напівдискретними рівняннями (30) та (33), можна отримати шляхом введенням віртуальної швидкості та тиску відповідно. Потім, застосуємо метод скінченних елементів та використовуючи ізопараметричні базисні функції, апроксимуємо покроково швидкості та тиски:

$$V^n(x) = \Phi(x)\bar{V}^n,\ p^n(x) = \bar{\Psi}(x)\bar{p}^n \quad (36)$$

Де Φ – матриця розмірності (3 × 3N) та $\bar{\Psi}$ – матриця розмірності (1 × N), складена з N базисних функцій. Після чого, ми отримаємо повністю дискретизованих та матричних рівнянь для покрокових значень тисків та швидкостей:

$$\boldsymbol{H}\bar{\boldsymbol{p}}^{n+\frac{1}{2}} = -\frac{1}{\Delta t}\boldsymbol{G}^{\boldsymbol{T}}\bar{V}^{n} - \boldsymbol{E}\bar{V}^{n+\frac{1}{2}} + \Theta^{n+\frac{1}{2}} + b_P \qquad (37)$$

$$\frac{1}{\Delta t}F(\bar{V}^{n+1} - \bar{V}^{n}) + A\bar{V}^{n} - G\bar{\boldsymbol{p}}^{n+\frac{1}{2}} + \boldsymbol{L}\bar{V}^{n+\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{2}\left(Q\bar{V}^{n+\frac{1}{2}} + R\bar{\boldsymbol{p}}^{n+\frac{1}{2}} - S\right) =$$

$$= \Gamma^{n+\frac{1}{2}} + b_V \qquad (38)$$

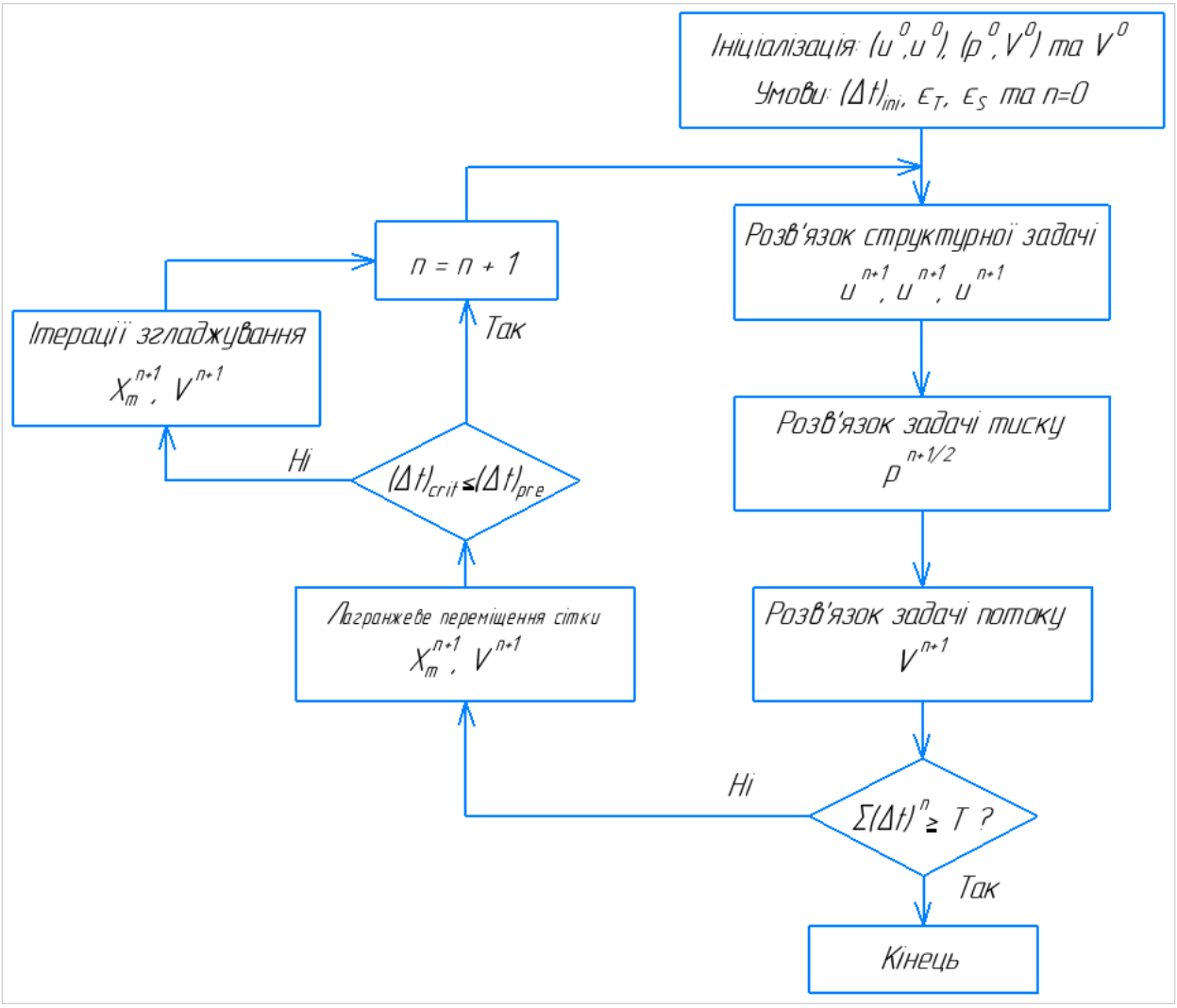


Рис.2.5. Блок-схема часово-інкрементної структури числової процедури для аналізу рідини

Як вказано на Рис. 2.5., який демонструє блок-схему часово-інкрементної структури числової процедури для аналізу рідини, спочатку вирішуємо рівняння (37) для $p^{n+1/2}$ зі заздалегідь заданим значенням $\dot{u}^n, \dot{u}^{n+1}, V^{n-1}$, $V^n, \hat{V}^n$ та граничними даними. Підстановка отриманого в рівняння (38) разом із іншими заданими значеннями, дозволяє нам знайти V^{n+1}.

2.4. Переміщення в методі ALE

Незважаючи на те, що швидкість сітки $\hat{V}$ є довільною, тим не менш, значення цієї характеристики повинно бути обрано з фізичної та числової точко зору. Вона повинна задовольняти данні умови:

$$(V^* - \hat{V}^n) \cdot n = 0 \ \ on \ \partial\Omega_F \quad (39)$$

$$\nabla \cdot (V^* - \hat{V}^n) = 0 \ \ in \ \Omega_F \quad (40)$$

І неповинна призводити до жодної числової нестійкості через надмірне спотворення сітки. Тому, її визначення стає важливим питанням в чисельному методі ALE. Треба зазначити, що вищезазначені умови тотожно задовольняються в лагранжевому підході, а остання умова (30) підтверджує відсутність зміни у загальному об'ємі рідини після переміщення сітки.

Існує декілька алгоритмів переміщення сітки, але вибір відповідної схеми залежить від типу задач та чисельних схем для рівнянь Нав'є-Стокса. Зазвичай, розрахунки виконуються шляхом комбінування двох, або трьох існуючих алгоритмів.

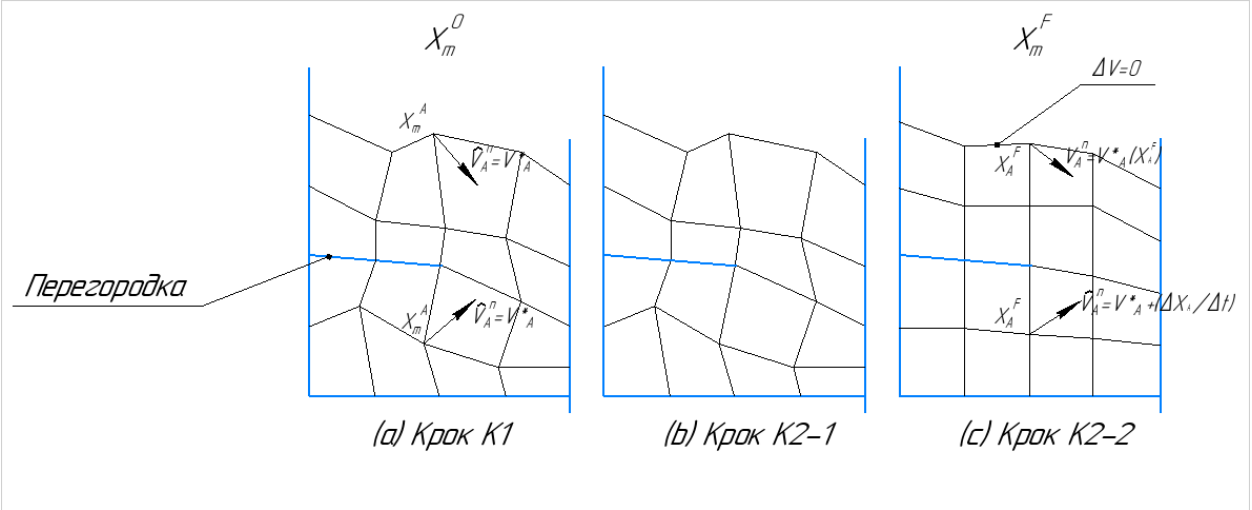


Рис. 2.6. Трьох крокова процедура перетворення сітки в двовимірному зображенні.

Для нашого дослідження переміщення сітки виконується через три кроки, як вказано на Рис. 2.6. Для кроку К1 приймаємо $\hat{V}^n = V^*$ для всіх вузлів. Другий крок виконується ітеративно і знову розділяється на два підкроки: при К2-1 виконується згладжування зовнішніх вузлів (тих, що знаходяться на границі), а потім К2-2 відбувається згладжування внутрішніх вузлів, для того, щоб мінімізувати

загальний час для всього процесу. Дві вищесказані фізичні умови (49) та (50) виконуються на кроці К2-1.

Коли ми позначимо x_A^c як поточне розташування вузла вільної поверхні АА до перетворення сітки, його нове місцерозташування буде x_A^0. Тому, після виконання кроку К1, отримаємо:

$$x_A^0 = x_A^c + \hat{V}_A^n \Delta t \quad (41)$$

де швидкістю сітки $V_A^0 = \hat{V}_A^n$. Оновлення всіх наявних вузлів вільної поверхні створює нову сітку x_m^0, вказану на Рис. 4(а). Далі ми вирішуємо, чи необхідне згладжування, відповідно до критеріїв, вказаних нижче. І якщо існує необхідність, то виконуємо процедуру згладжування.

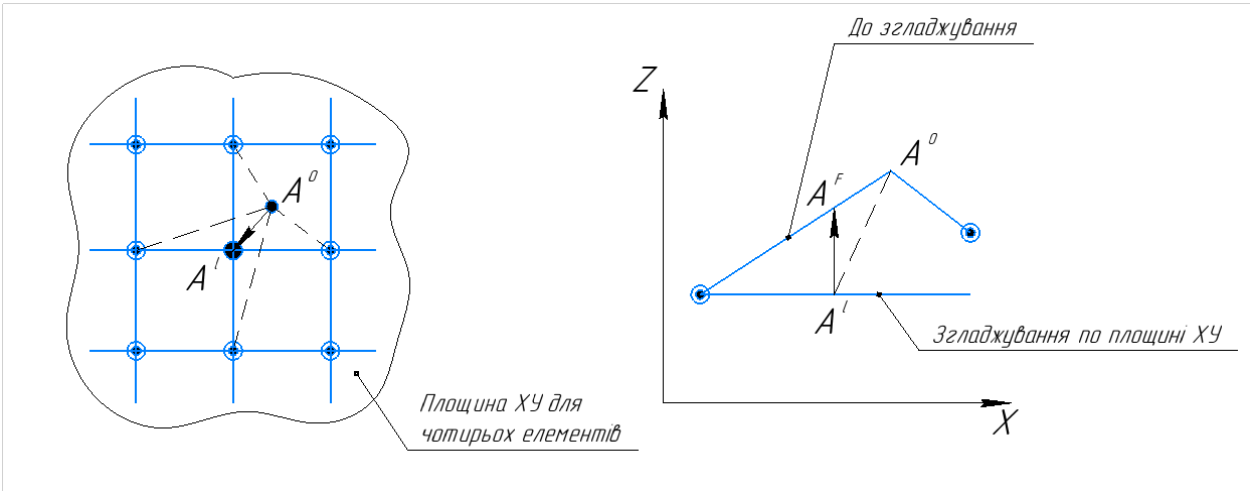


Рис. 2.7. Просте геометричне усереднення граничних вузлів.

Звертаючись до Рис. 2.7., можна спостерігати, що навколишні вузли граничного вузла А складаються з інших граничних вузлів, що підтримують вузол А. Координати вільної поверхні x^0 та швидкості сітки V^0 всіх підтримуючих елементів можна відобразити на двовимірному білінійним простором. Спочатку згладжуємо дві тангенціальні компоненти координат на площині XY вузла А за допомогою ітеративного простого методу усереднення:

$$(x_\alpha)_A^l = (x_\alpha)_A^{l-1} + \frac{1}{m_A}\sum_{M=1}^{m_A}(x_\alpha)_M,\ \alpha = t_1, t_2 \text{ і } l = 1, 2, 3, \ldots \quad (42)$$

де l вказує на цикл ітерації. Водночас його нормальний компонент $(x_n)_A$ визначається з основного параметричного співвідношення функції відображення координат. Потім, отримаємо кінцеве положення x_A^F граничного вузла А, що переміщається. І відповідно цьому, швидкість сітки буде $\hat{V}_A^n = V^0(x_A^F)$, що виходить із функції відображення швидкості.

З іншого боку, оточуючі вузли будь-якого внутрішнього вузла A – це всі вузли, окрім самого вузла A, елемента, що підтримують вузол A. Потім його положення оновлюється:

$$\mathrm{x}_A^l = \mathrm{x}_A^{l-1} + \frac{1}{m_A}\sum_{M=1}^{m_A} x_M,\ \ l = 1, 2, 3, \ldots \quad (43)$$

Потім, кінцеве положення внутрішнього вузла A, що переміщується, визначається як $\mathrm{x}_A^F = \mathrm{x}_A^l$ з відповідною швидкістю $\hat{V}_A^n = V_A^0 + (\mathrm{x}_A^F - \mathrm{x}_A^c)/\Delta t$. Після виконання згладжування всіх поверхневих і внутрішніх вузлів, можливо буде обчислити загальний об'єм рідини у сітці та порівняти його з початковим об'ємом для розрахунку змін. Щоб уникнути накопичення зміни об'єму протягом одного періоду часу, коригуємо вертикальні координати всіх вільно поверхневих вузлів згідно з формули:

$$(x_n)_A^F = (x_n)_A^F - \Delta V / Area(\partial\Omega_F^S) \quad (44)$$

Це завершує процедуру переструктуризації сітки для отримання сітки в кінцевому її вигляді x_m^F з оновленим вузловими координатами x_A^F та швидкістю сітки $\hat{V}^n$, як показано на Рис. 1.22., що необхідно для наступного кроку обчислення метода ALE.

2.5. Числова стійкість та збіжність

Числова стійкість стосується здатності методу генерувати точні результати, які не надто чутливі до невеликих збурень, або помилок у вхідних даних чи розрахунках. У випадку розглянутого методу, необхідно переконатись, що обраний часовий крок, просторова дискретизація та інші параметри підходять для збереження стійкості протягом усього обчислювального процесу.

Згідно з Ньюмарком [21], неявна схема постійного середньої прискорення (23) забезпечує безумовну стійку часову відповідь, тому критичний крок часу для стійкого та збіжного аналізу рідини-структури визначається завдяки явної схеми часової інтеграції для руху рідини. Як відомо, збіжність та стійкість явної схеми для рівнянь Нав'є-Стокса гарантується лише тоді, коли числові параметри задовольняють критерій Куранта:

$$(\Delta t)_{crit} \leq h/(c + u) \quad (45)$$

c – величина, що представляє швидкість звуку в потоці рідини, u – швидкість потоку, а h – найменша відстань між двома сусідніми вузлами сітки. Треба зазначити, що виконання згладжування сітки необхідно для того, щоб скоротити час обробки інформації. Однак, реалізація процесу згладжування на кожному етапі часу – не найкраща ідея, оскільки потребує для виконання даної дії велику кількість числових ітерацій. Тому, для спрощення досліджень, можливо проводити процес згладжування лиже тоді, коли виконується умова $(\Delta t)_{crit} \leq (\Delta t)_{pre}$. Тут заздалегідь встановлений допустимий розмір кроку часу $(\Delta t)_{pre}$ обирається таким чином:

$$(\Delta t)_{pre} = \varepsilon_T \cdot (\Delta t)_{ini} \quad (46)$$

де $(\Delta t)_{ini}$ відноситься до критичного розміру кроку часу, обчисленого з початковою сіткою. З іншої сторони, необхідно визначити ефективний критерій зупинки для ітераційного процесу згладжування. Як були раніше зазначено, даний процес згладжування виконується вузол за вузлом, тому він перетворюється в нелінійну задачу вузлового типу. У даному випадку, використовуючи критерій збіжності, запишемо як:

$$\frac{\max\limits_{A \in X_m} |d_A^{l+1}|}{|d_A^l|} \leq \varepsilon_S, \quad l = 1, 2, 3, \ldots \quad (47)$$

де $d_A^l = \left| x_A^l - x_A^{l-1} \right|$.

2.6. Висновок до розділу 2.

В даному розділі було розглянуто основні теоретичні відомості щодо методу ALE, його особливості під час динамічного аналізу рідини у резервуарі та його ефективність в порівнянні з методами Ейлера та Лагранжа, об’єднуючи переваги.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ДЕМПФЕРУ КОЛИВАНЬ РІДИНИ У РЕЗЕРВУАРІ.

3.1. Основні відомості та характеристики досліджуваного резервуара та демпферу

В даній частині бакалаврської роботи, продовжуючи тему дослідження коливань рідини у резервуарах та методів їх демпфування, виконаємо числові моделювання за допомоги функціоналу програмного забезпечення САПР – SOLIDWORKS зі встановленим модулем Flow Simulation.

У якості досліджуваного об’єкту оберемо вагон-цистерну моделі 15-7076 (Рис. 3.1.), виробництва ПАО «КРЮКІВСЬКИЙ ВАГОНОБУДІВНИЙ ЗАВОД», що використовується для перевезення світлих нафтопродуктів по всій мережі залізниць зі шириною колії 1520 мм. Даний вагон-цистерна був обраний через їх широке застосування в Україні та Східній Європі.

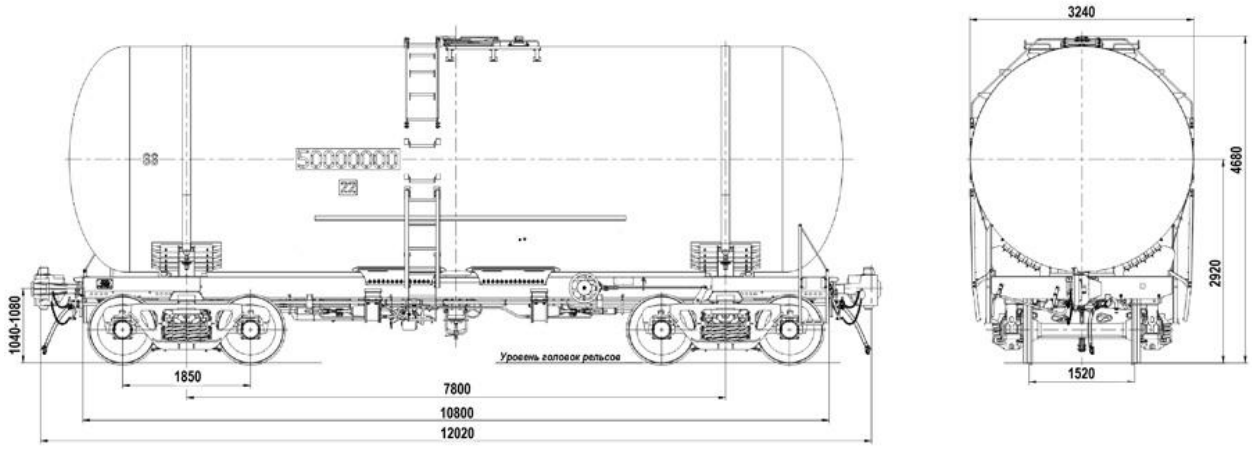


Рис. 3.1. Загальний вид вагона-цистерни моделі 15-7076

В Таблиці 3.1. вказані заявлені виробником загальні характеристики вагонів-цистерн моделей 15-7076:

Таблиця 3.1. Технічні характеристики вагонів-цистерн.

Модель	**15-7176**
Вантажопідйомність, не більше, т	67,3

Об'єм котла повний (корисний), м³	85,56 (83,91)
Маса тари, не більше, т	26,7
Розрахункове статичне навантаження від колісної пари на рейки, кН(тс)	230,5 (23,5)
Довжина вагона по осям автозчеплення, мм	12020
Габарит по ГОСТ 9238	1-ВМ
Висота до осі зчеплення від рівня головок рейок, мм	1060±20
Візок	18-7055 тип 2
Ширина колії, мм	1520
Міжремонтний пробіг, років (тис. км)	3 (210)
Конструкційна швидкість, км/год	120

Згідно з інформацією від виробника, данні вагони-цистерни використовують цистерну типу 66 [22], що є одним із найпоширеніших типів цистерн для перевезення світлих нафтопродуктів (Рис. 3.2.).

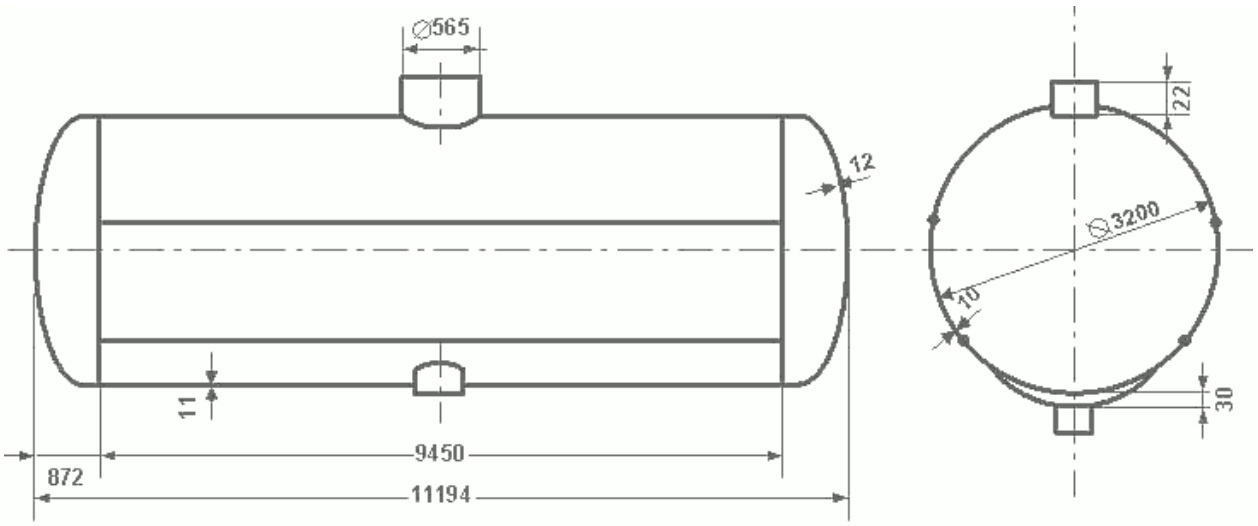
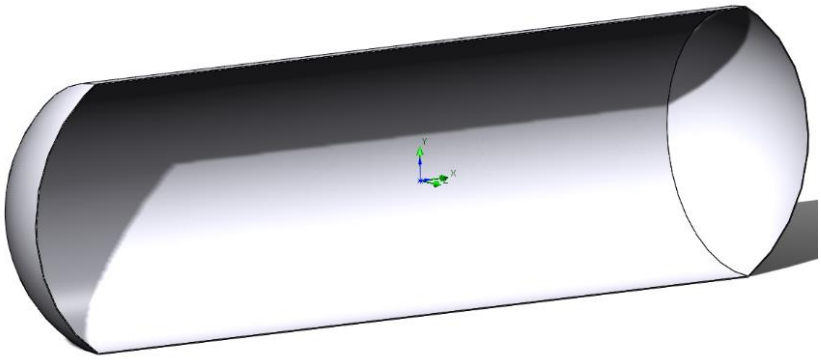
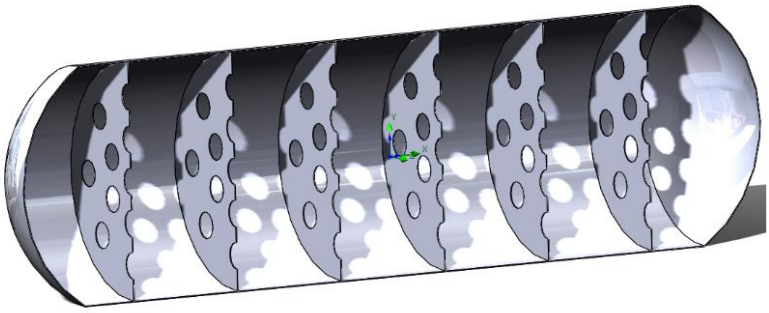


Рис. 3.2. Параметри цистерни типу 66

Тому, для вивчення впливу демпферів на динамічні зміни коливань рідини на резервуари проведемо два експерименти, змоделював можливі варіанти дії рідини для однієї та тієї самої цистерни без перегородок та зі встановленими перегородками (Рис. 3.3):



а) Резервуар без перегородок



б) Резервуар зі встановленими перегородками

Рис. 3.3. Модель резервуара (а) без перегородок та (б) з перегородками

Для обраної геометрії резервуара та дослідження явища коливань рідини усередині, розробимо перегородку, яку будемо досліджувати та порівнювати із конфігурацією без демпфуючих елементів, що активно використовується під час перевезення рідин. Тому, для подальшого дослідження та моделювання візьмемо у якості рідини дизельне пальне, що заповнює 70% об'єму резервуара від значення повного об'єму (85.56), що дорівнює 59,892. Відомі данні о геометрії резервуара, його матеріала та рідини, що транспортуємо, додаймо до Таблиці 3.2.:

Таблица 3.2. Загальні характеристики рідини та резервуара.

	Матеріал		Геометрія (мм)		
Структура резервуара (сталь 09Г2С):	Густина p_s, [кг/м^3]	$8.6 \cdot 10^{-3}$	Діаметр резервуара D	3600	
	Модуль Юнга E, [Н/м^2]	$2 \cdot 10^{11}$	Довжина резервуара H	11194	
	Коефіцієнт Пуассона υ	0.3	Товщина стінок t	10-12	
	Текучість σ_γ, [Н/м^2]	$3.4 \cdot 10^8$	Товщина перегородок t_b	10	
Рідина (дизельне паливо):	Густина p_F, [кг/м^3]	840	Висота заповнення рідиною H_F	70%	2880

	Модуль всебічного тиску κ, [Н/м^3]	$1.6 \cdot 10^9$	Діаметр внутрішніх отворів перегородки D_B	360
	Кінематична в'язкість μ, [м^2/с]	$8.94 \cdot 10^{-6}$		

3.2. Дослідження та моделювання рідини у резервуарі

Для подальших досліджень явища демпфування коливань рідини, проведемо моделювання різкого гальмування для того, щоб спостерігати поведінку рідини у резервуарі без встановлених перегородок та зі встановленими перегородками. Час спостереження встановимо рівним 10с, щоб спостерігати навантаження під час гальмування. Резервуар вважаємо розташованим горизонтально, з напрямом дії сили тяжіння по осі Y. В момент часу t=0, цистерна починає гальмування, що призводить до зміщення рідини вправо, в напрямку осі X (Рис 3.4.). Також зазначимо, що даний резервуар заповнений на 70%.

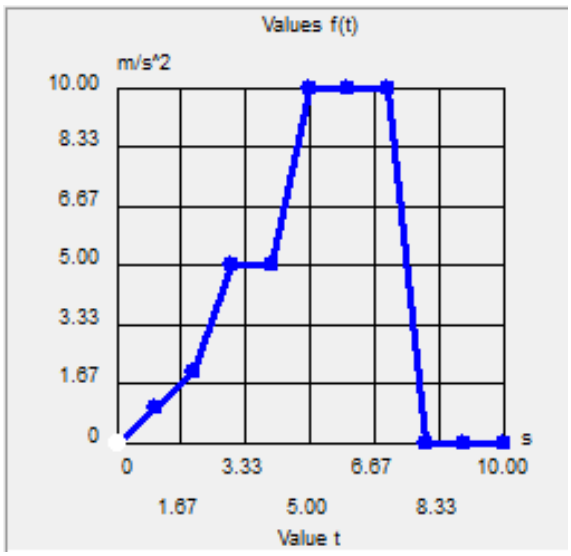


Рис. 3.4. Прискорення по осі X залежно від часу

Спочатку, досліджуємо вплив відсутності перегородок та їх наявності на коливання рідини. Для цього в програмному забезпечені SolidWorks розробимо модель резервуара (Рис. 3.5.) та проведемо перше моделювання для даного випадка.

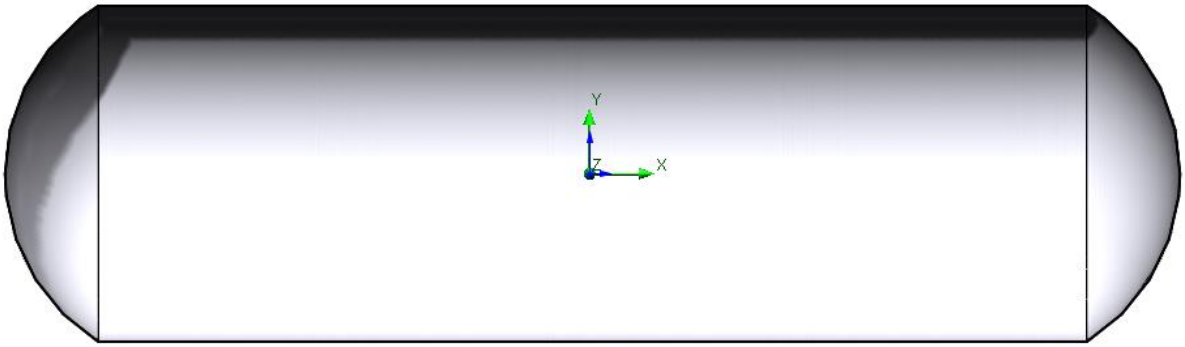


Рисунок 3.5. Модель цистерни без встановлених перегородок

Наступним кроком, перед тим як почати симуляцію, додаємо до існуючої моделі резервуара рідину, що буде займати, згідно до обраних умов, 70% усього внутрішнього об’єму, як вказано на Рис. 3.6.

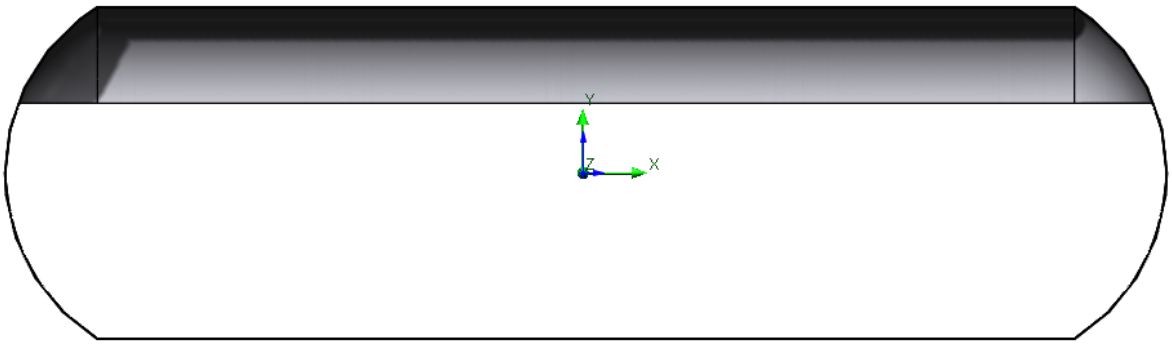


Рисунок 3.6. Модель цистерни, що заповнена рідиною на 70%

Коли дана модель була розроблена, можна почати виконувати симуляції поведінки рідини. Вводимо необхідні данні до SolidWorks, вказуючи в якій системі вимірювання буде проводитись дане моделювання, тип аналізу, обираємо рідини та гази усередині резервуару, та початкові умови моделювання. (Рис. 3.7.).

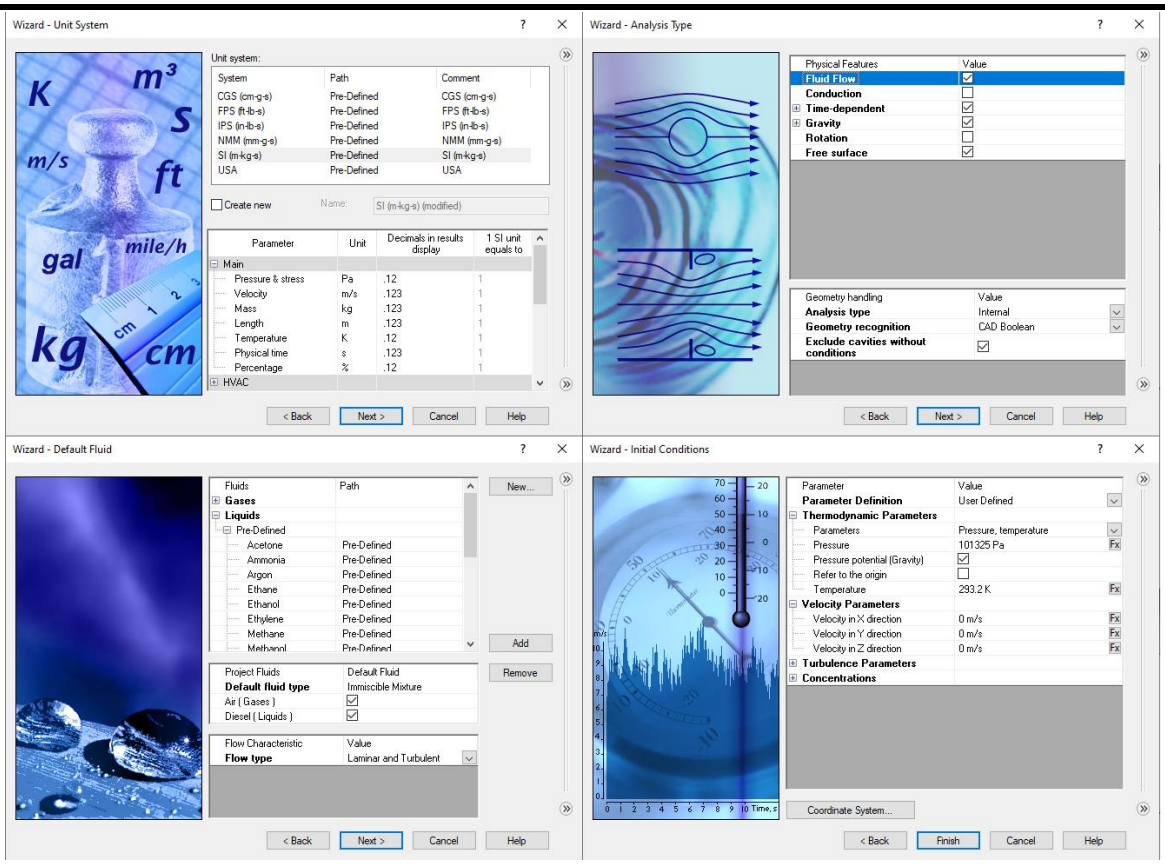


Рисунок 3.7. Початкові умови моделювання в Wizard Flow Simulation

Після вказання початкових умов, виконуємо більш точну налаштування. Створюємо сітку (Рис. 3.8.), вказуємо об’єм (Рис. 3.9.), заповнений рідиною, та встановлюємо цілі, які ми хочемо дослідити (Рис. 3.10.).

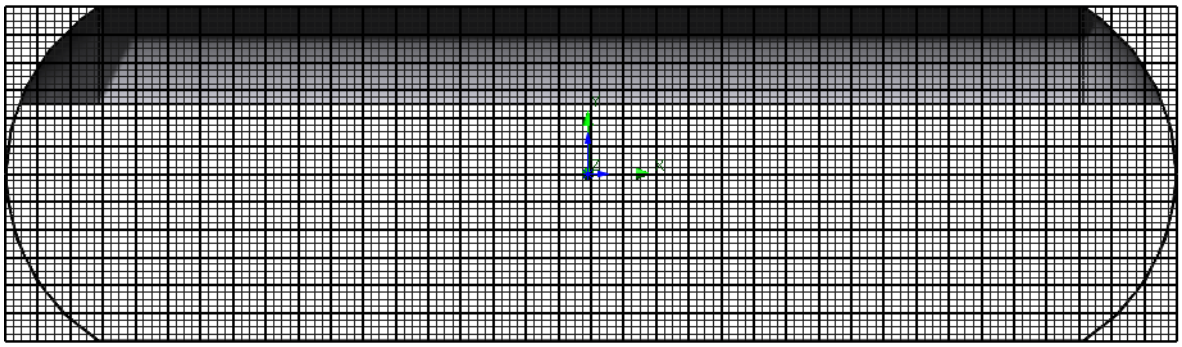


Рисунок 3.8. Глобальна сітка резервуара та рідини.

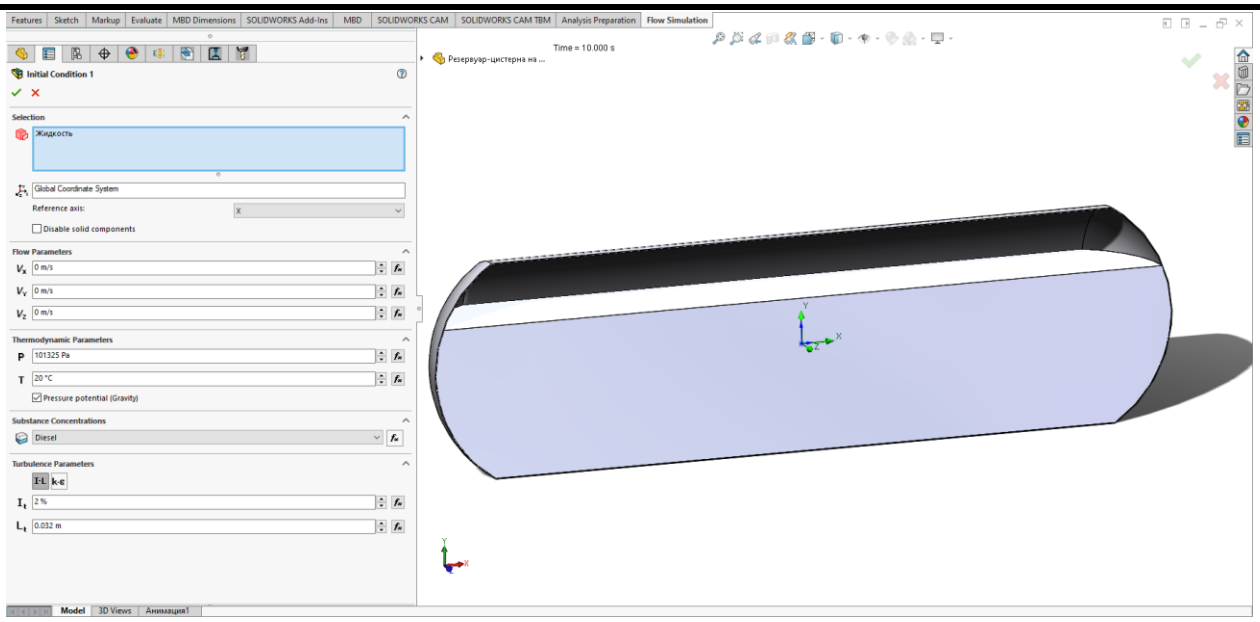


Рисунок 3.9. Налаштування об'єму рідини

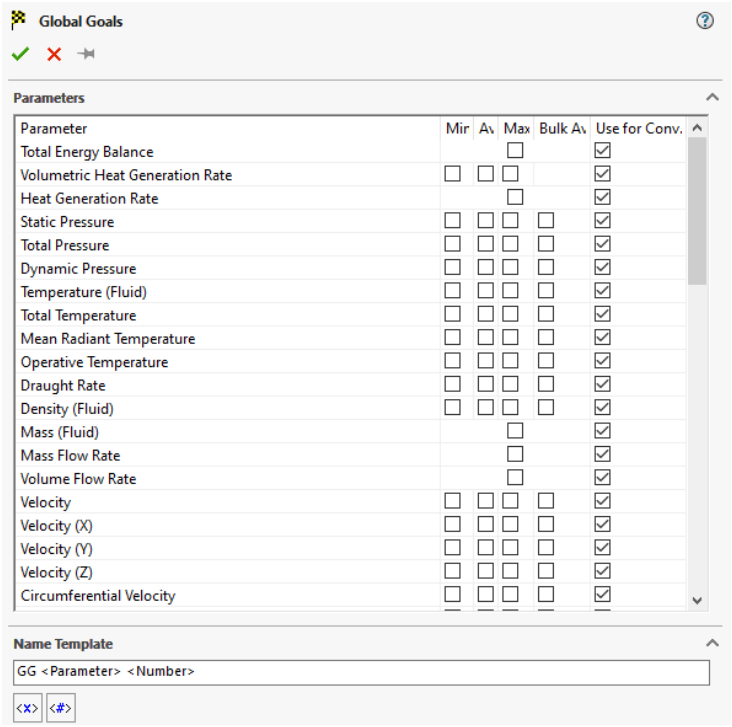


Рисунок 3.10. Налаштування цілей симуляції

Після даних налаштувань, коли буди обрані всі необхідні для дослідження умови, можна проводити симуляції поведінки рідини в резервуарі під час різкого гальмування. Запускаймо програму, та в залежності від обраного розміру сітки та технічних характеристик комп'ютера, на якому виконуємо дослідження, чекаємо виконання симуляції до 10 хвилин. (Рис. 3.11.)

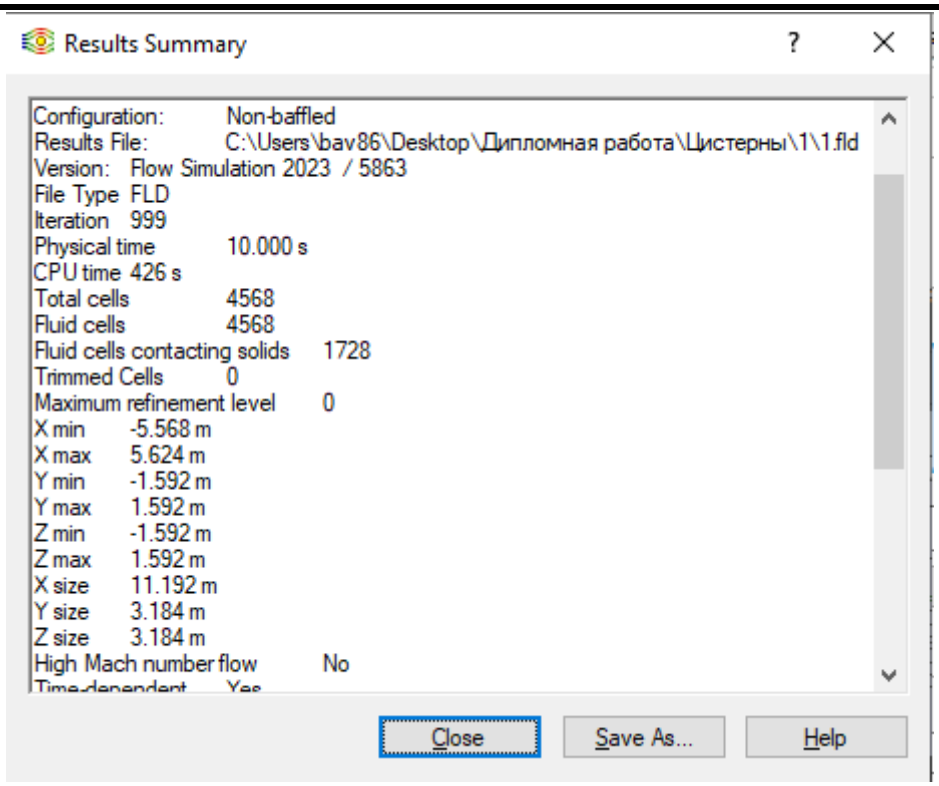


Рисунок 3.11. Загальні результати симуляції

Як результат, завдяки широкому функціоналу SolidWorks та розширенню Flow Simulation, ми маємо можливість більш детально оглянути результати симуляції, створити анімації та графіки. (Рис. 3.12.)

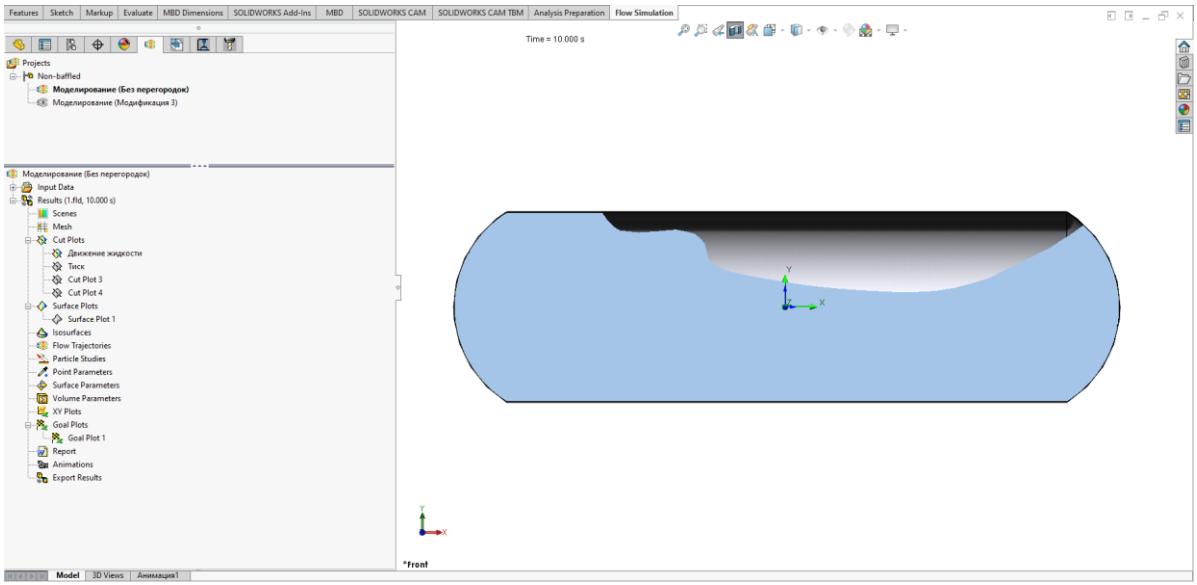


Рисунок 3.12. Результати симуляції

Після проведення симуляції коливань рідини у пустій цистерні, повторимо данні кроки, але вже для варіанту зі встановленими демпфуючими елементами. У досліджуваний резервуар встановлюється перегородки, кількістю n=6, що мають в своїй конструкції перфорацію з 15 отворів діаметром $D_B = 0.1D$ та рівномірно розташовані по всій довжині.

Для цього, розробимо креслення перегодки (Рис. 3.13.) та на її основі створимо 3D модель.

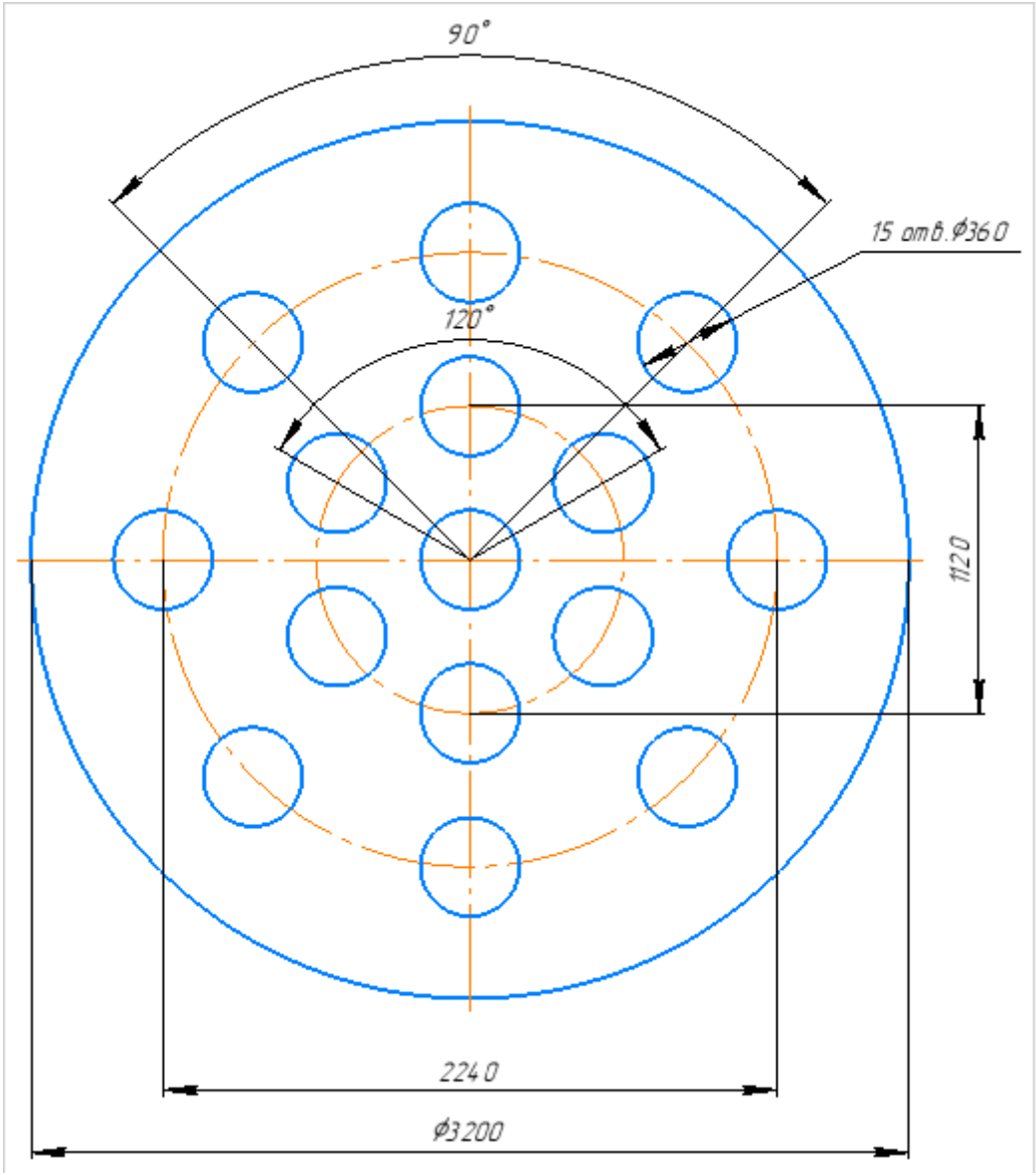


Рисунок 2.13. Креслення перегородки

Далі, модифікуємо початковий варіант, встановлюючи усередину перегородки (Рис. 3.14.).

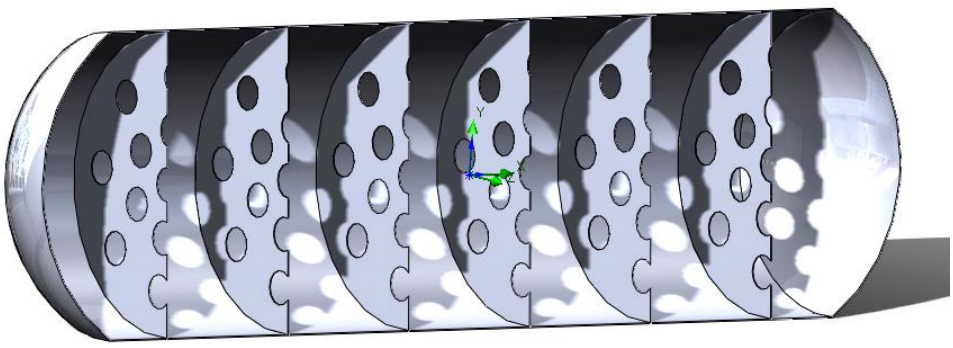


Рисунок 3.14. Модель резервуара зі встановленими перегородками

Після оновлення моделі з додаванням перегородок, виконаємо повторне моделювання коливань рідини у резервуарі. Отриманні данні збережемо для виконання наступного кроку даної дипломної роботи – аналізу отриманих даних. Створюємо нову сітку з урахуванням зміни геометрії внутрішнього об'єму досліджуваного резервуара (Рис. 2.15.).

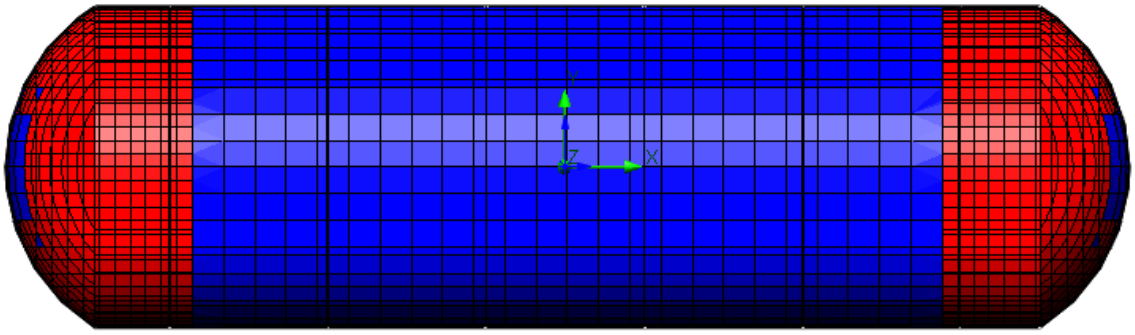


Рисунок 3.15. Сітка резервуара зі встановленими перегородками

Як результат, отримаємо повну інформацію о проведеній симуляції, що дозволить перевірити ефективність та необхідність встановлення даних демпфуючих пристроїв усередині резервуара.

На Рис. 3.16. вказано результати моделювання, де наглядно продемонстровано дію коливань рідини в резервуарі (а) без перегородки та (б) з перегородками під час гальмування, що дозволяє виконати візуальний аналіз поведінки коливань рідини під час гальмування.

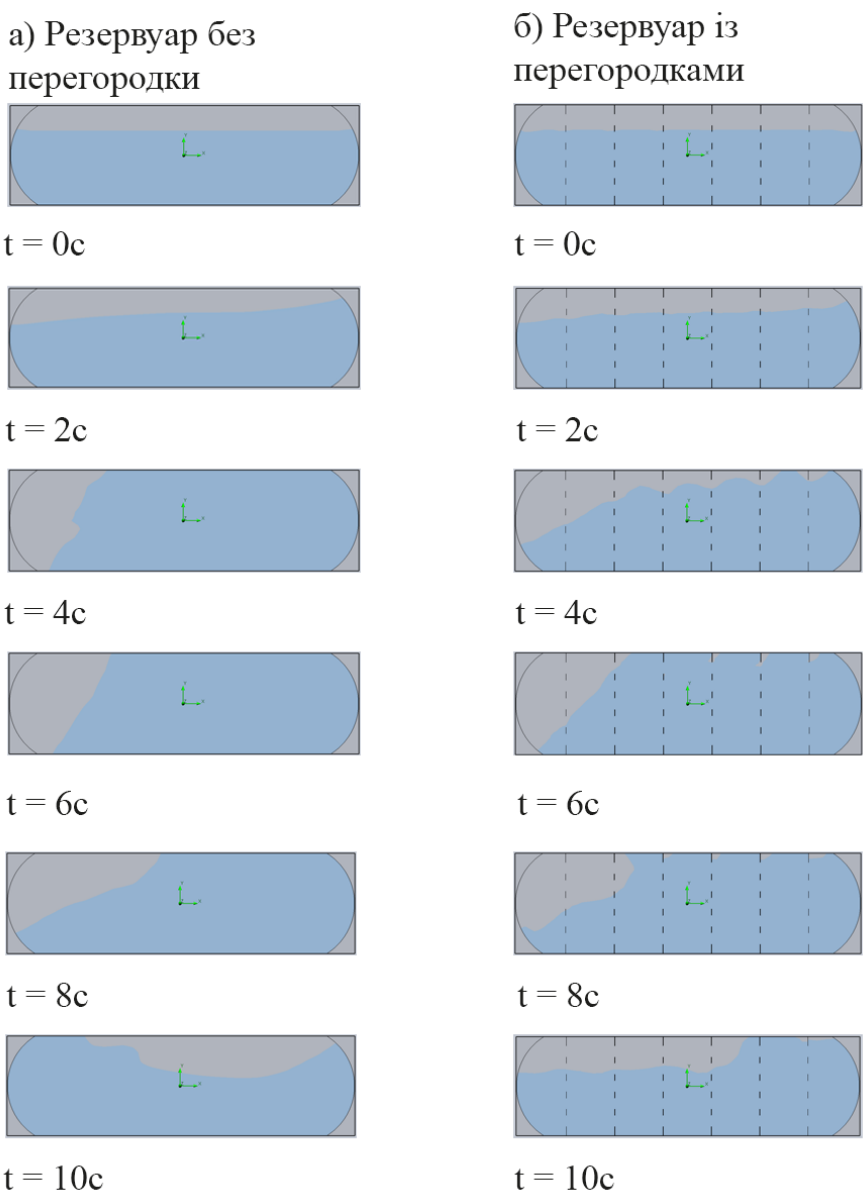


Рис. 3.16. Коливання рідини у резервуарі (а) без перегородки та (б) з перегородками протягом 10с.

На Рис. 3.17 та Рис. 3.18 показані схеми потоків внутрішньої рідини у випадках, коли в резервуарі відсутні перегородки та зі встановленими перегородками відповідно. Як можна побачити, при відсутності перегородок, потік має просту структуру зі чіткими напрямками руху та є практично однорідним на кожному із етапів часу. Однак, вже при встановленні перегородок власного дизайну, потік стає складним і нерівномірним з розвитком часу. Крім того, утворюються вихрові потоки в окремих ділянках, а також в основному потоці через внутрішні отвори перегородок. Також, швидкість потоку з часом значно зменшується.

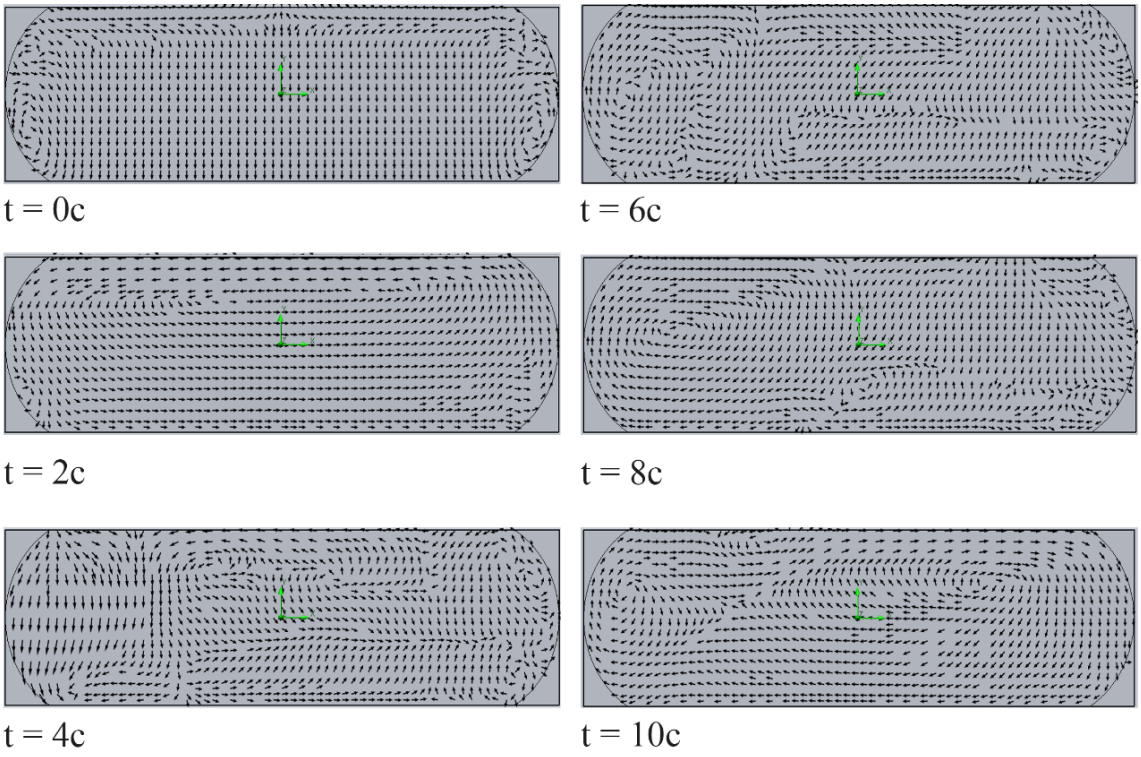


Рис. 3.17. Профілі внутрішніх потоків (Без перегородки)

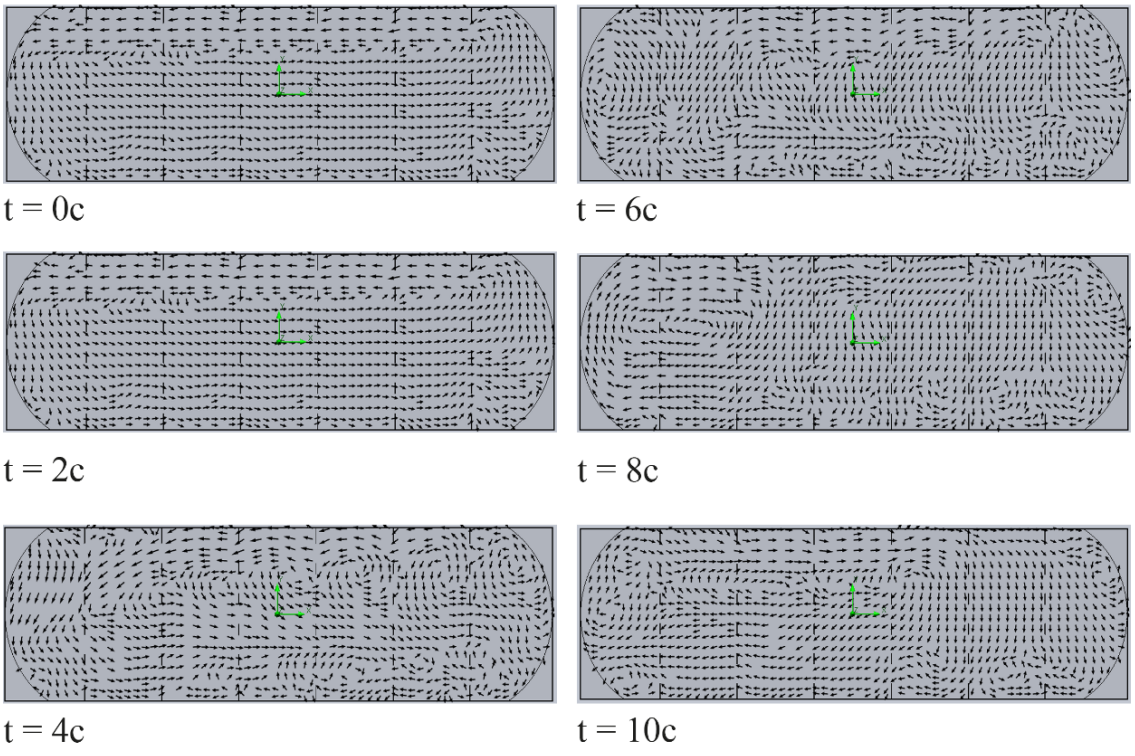


Рис. 3.18. Профілі внутрішніх потоків (Зі перегородками)

На Рис. 3.19. вказані розподіл тисків рідини для обох варіантів компоновки резервуарів. Згідно з візуального аналізу, спостерігаємо те, що при наявності перегородок (Рис. 3.19. а), середні на максимальні значення тиску менші, ніж у варіанті без встановлених демпфуючих елементів (Рис. 3.19. б).

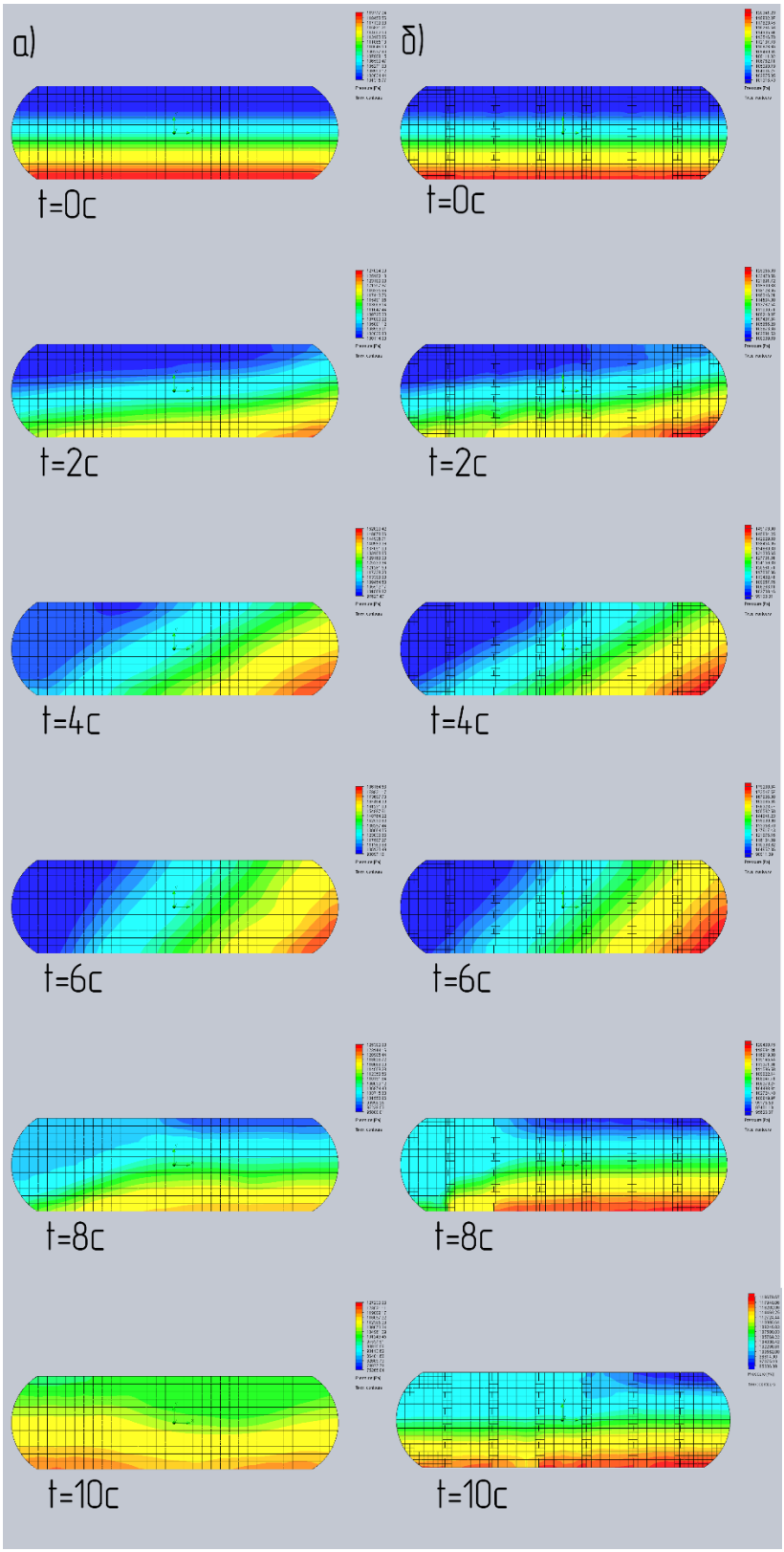


Рисунок 3.19. Розподіл тисків у резервуарах без перегородок (а) та з перегородками (б)

3.3. Висновки до розділу 3.

За допомоги використаного функціоналу програмного забезпечення САПР – SOLIDWORKS з модулем для симуляції потоків рідини Flow Simulation було виконано моделювання поведінки коливань рідини усередині резервуара. Це дозволило забезпечити можливість провести реалістичні числові симуляції гідродинамічних процесів для двох розглянутих варіантів: резервуару без встановлених перегородок та зі встановленими перегородками.

Було проведено симуляцію фізичних коливань рідини, враховуючи реальні геометричні параметри резервуара та перегородок. За допомоги програмного забезпечення було отримано числові дані, які дозволять провести ретельний аналіз впливу перегородок на коливання рідини та порівняти результати.

РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

У даному розділі дипломної роботи буде проведений аналіз отриманих даних під час моделювання та симуляції поведінки коливань рідини у резервуарі за допомоги програми CAD – SolidWorks зі встановленим модулем Flow Simulation. Основним завданням даного розділу є порівняння ефективності та необхідності встановлення перегородок усередині резервуара.

Аналіз отриманих даних дозволить встановити наступні важливі моменти:

- Вплив перегородок на характер коливань;
- Розподіл коливань у резервуарі;
- Ефективність перегородок;
- Вплив на роботу системи.

Загальний аналіз отриманих даних допомагає зрозуміти, як наявність перегородок впливає на коливання рідини у резервуарі. Це має значення для визначення необхідності встановлення перегородок.

4.1. Порівняння отриманих даних для резервуарів без перегородок та з ними

Наступним кроком буде аналіз отриманих даних та порівняння характеристик двох варіантів резервуарів. Рис. 3.16. дозволяє нам спостерігати загальні зміни положення рідини, але не дозволяє оцінити більше детально сили та моменти, що діють. Числові результати дають нам кращу можливість порівняти реакційні навантаження та енергію турбулентності.

Завдяки функціоналу SOLIDWORKS зі встановленим модулем Flow Simulation, у нас є можливість порівняти отримані данні між собою та перевірити ефективність встановлення перегородок у резервуарі з конфігурацією без них.

На Рис. 4.1. зображено дію сил усередині рідини для обох конфігурацій резервуара, що дозволяє сказати, що сили затухають швидше у конфігурації із перегородками, хоча и не значно.

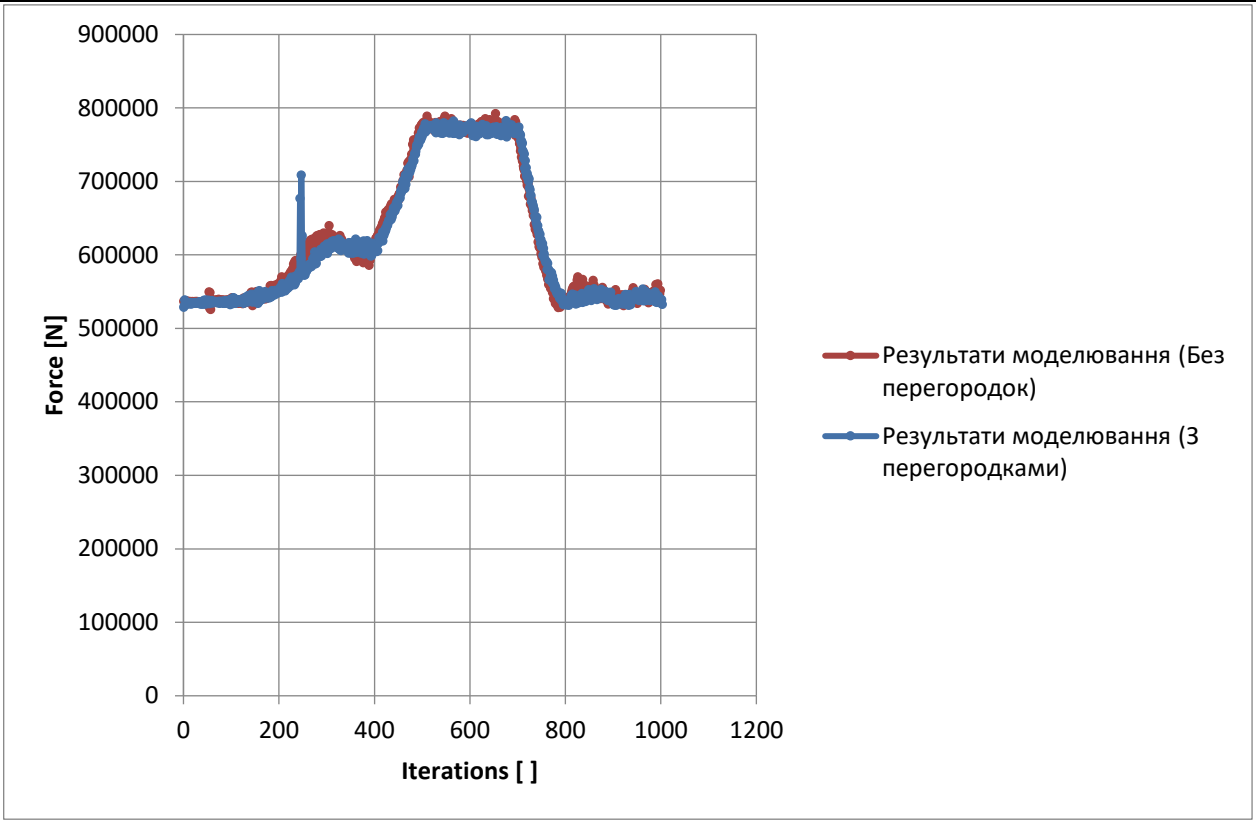


Рис. 4.1. Залежність сили від зміни ітерацій

Продовжуючи дослідження, проведемо порівняння результатів середньої турбулентної енергії для обох випадків. Як видно з Рис. 4.2., резервуар зі встановленими перегородками, турбулентний рух рідини є меншим, ніж у варіанті без перегородок.

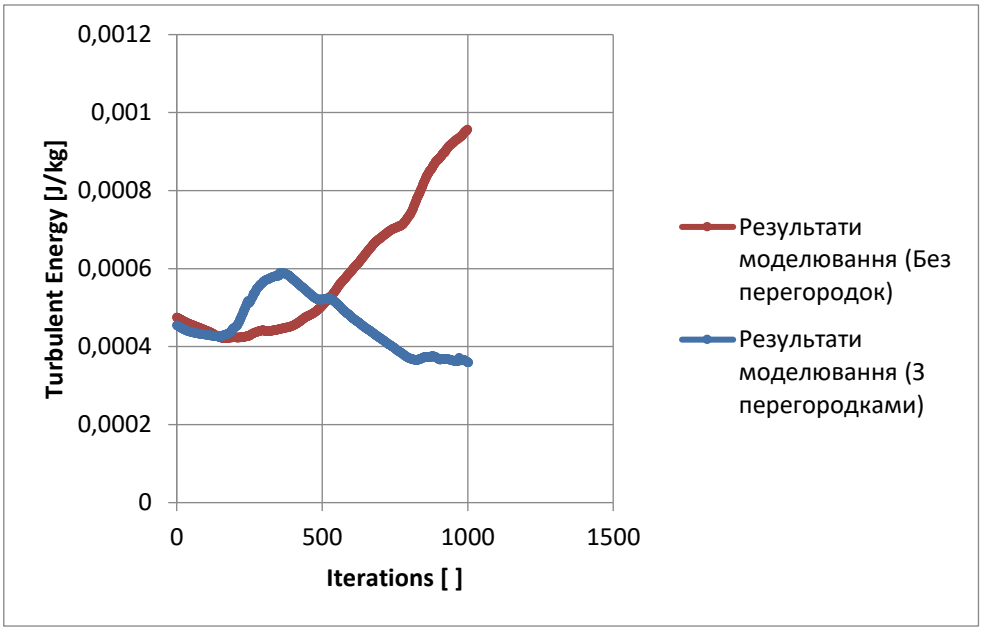


Рис. 4.2. Залежність значення турбулентної енергії від зміни ітерацій

Наступним кроком буде порівняння отриманих результатів динамічного тиску рідини у резервуарі. С Рис. 4.3. можна спостерігати, що у конфігурації зі встановленими перегородками, завдяки тому, що вони зменшують загальну

швидкість потоку рідини, створюючи опори та розподіляючи турбулентну енергію, динамічний тиск є значно меншим, ніж в варіанті без перегородок.

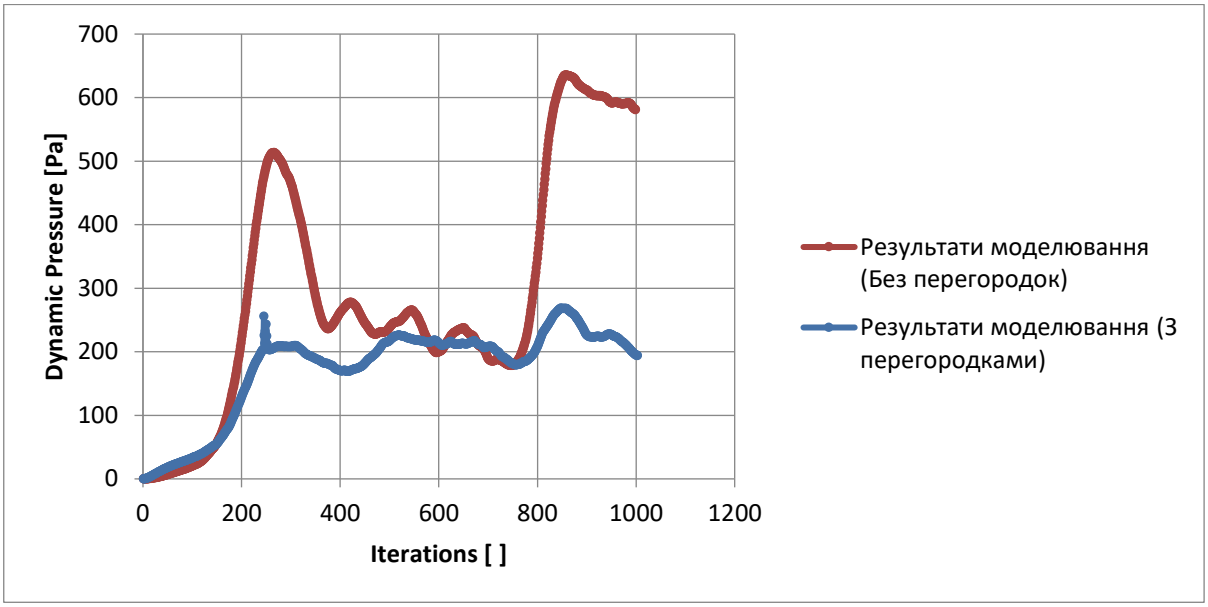


Рис. 4.3. Залежність значення динамічного тиску від зміни ітерацій.

Також, завдяки встановленню перегородок у резервуарі, згідно з Рис. 4.4., можна спостерігати те, що швидкість потоку рідини усередині буде меншою, ніж без наявності перегородок у конструкції.

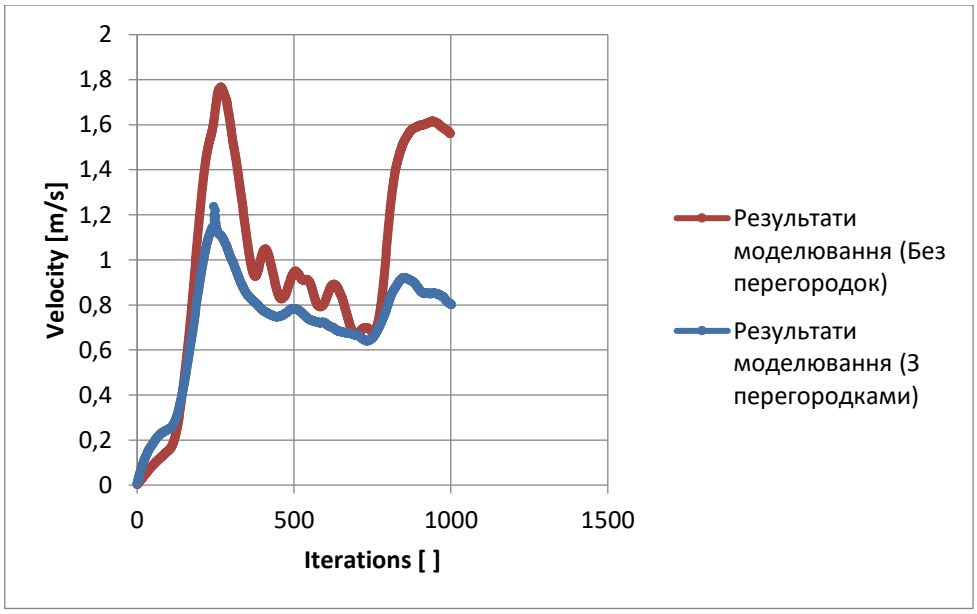


Рис. 4.4. Залежність значення швидкості потоку від зміни ітерацій.

Останнім кроком, порівняємо напруження зсуву для обох конфігурацій рідини. Згідно з отриманих даних моделювання, порівняємо їх згідно Рис. 4.5. Як можна побачити, наявність перегородок суттєво впливає зменшення напруження зсуву та поясняється тим, що перегородки створюють супротив швидкості потоку рідини.

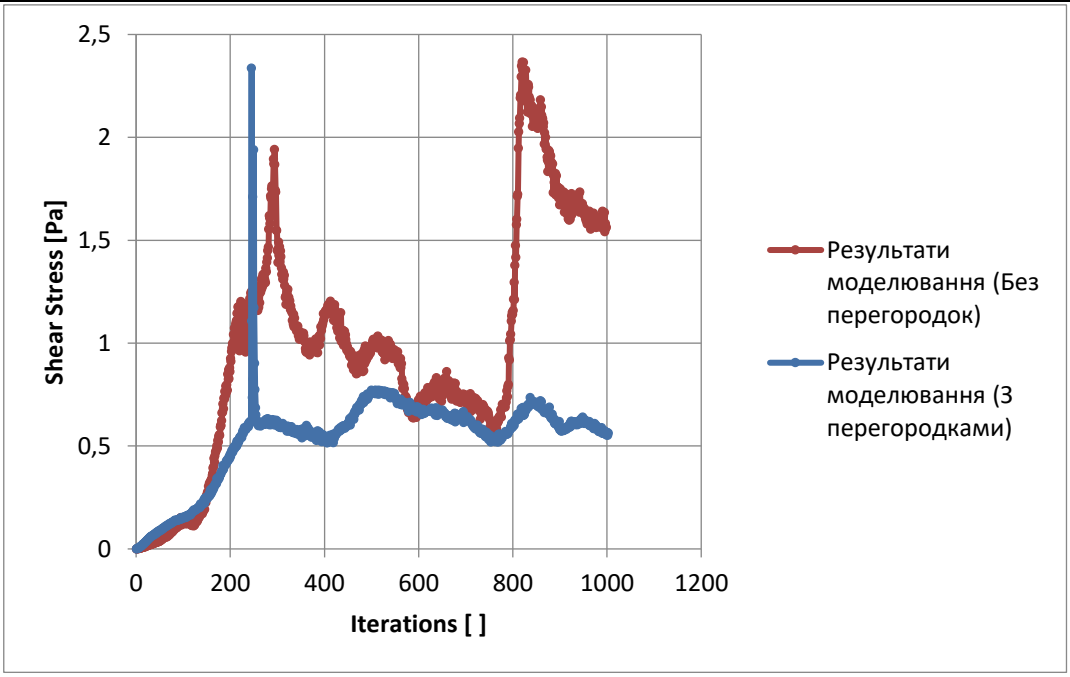


Рис. 4.5. Залежність значення напруження зсуву від зміни ітерацій.

Отримані результати, що вказані в графіках порівняння резервуара зі встановленими перегородками та без них дозволяють впевнено сказати, що наявність перегородок дозволяє значно покращити контроль коливань рідини та є ефективним заходом для зменшення їх негативного впливу на стінки резервуара.

4.2. Висновок до розділу 4.

Підводячи підсумок до виконаного дослідження коливань рідини у резервуарів та методів їх демпфування для циліндричних цистерн, був проведений аналіз ефективності запропонованої конструкції перегородки у порівнянні з конфігурацією без встановлених демпфіруючих пристроїв.

Шляхом моделювання запропонованої конструктивної форми перегородки у резервуарі на основі залізничної цистерни типу 66, було продемонстровано, що наявність перегородок відіграють важливу роль у зменшенні напруження та деформації, що виникають на стінках резервуара.

Порівнюючи отримані результати у двох конфігураціях під час процесу різкого гальмування: зі встановленими перегородками та без них; можна спостерігати, що вплив коливань та перетікань рідини усередині може створювати проблеми під час їх перевезення. І тільки завдяки встановленню демпфіруючих елементів, як перегородки, можна зменшити напруження та небезпеку виникнення катастрофічних ситуацій.

РОЗДІЛ 5. ТЕХНОЛОГІХ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ

В даній частині дипломної роботи буде розглянуто технологічну частину виготовлення перегородки для демпфування коливань рідини у цистерні типу 66 (Рис. 5.1.).

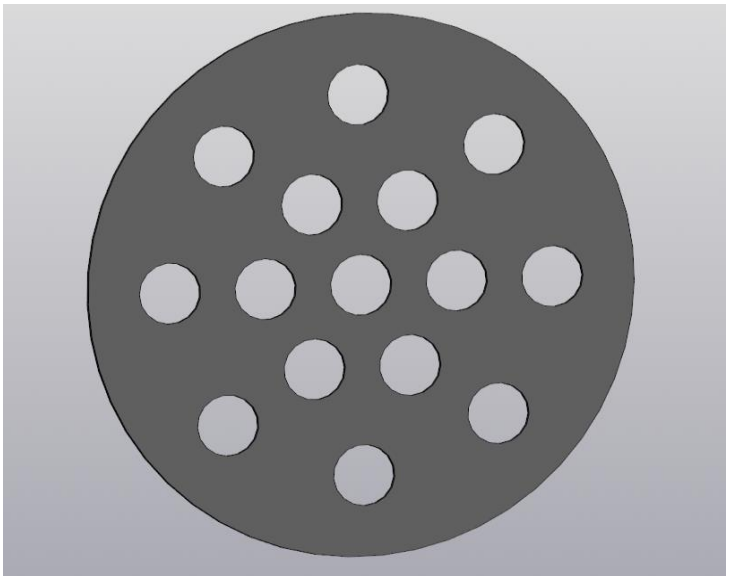


Рис. 5.1. 3D Модель перегородки

5.1. Вибір матеріалу

Для виготовлення даних перегородок, що в наступному будуть встановлені усередині вагону-цистерни 15-7076, у якості матеріалу буде обрана сталь 09Г2С, що використовується для виготовлення самої цистерни.

Сталь 09Г2С [23] відноситься до конструкційних низьколегованих сталей та е однією із найпопулярніших марок легованої сталі в Україні. Активно використовується для виготовлення парових котлів різноманітних труб для транспортування газів та рідин, нафтогазове обладнання та інше.

Завдяки своїм конструкційним особливостям, як висока термостійкість, підвищена технологічна пластичність та високий рівень стійкості до корозії, що ідеально підходить для використання під час перевезення нафтопродуктів та інших рідин.

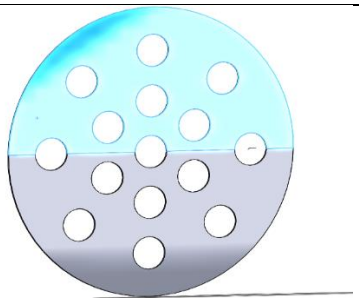
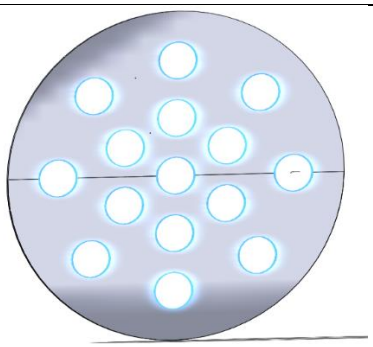
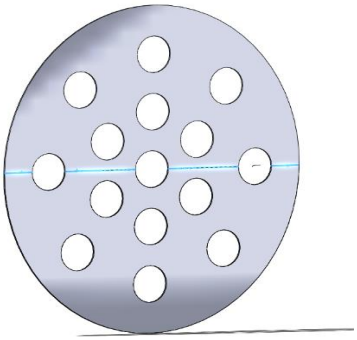
5.2. Проектування технологічних послідовностей оброблення поверхонь

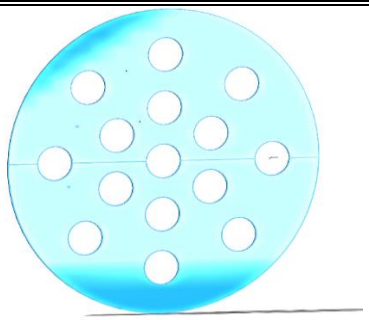
Конструкцію деталі можна розділити на сукупність типових геометричних фігур, що об’єднані загальним службовим призначенням деталі. Типовими

елементами конструкції є внутрішні циліндричні поверхні та сукупність зовнішніх площин.

Для опису маршруту оброблення деталі необхідно ідентифікувати поверхні, визначити способи оброблення кожної з поверхонь. В Табл. 5.1. вказано послідовність обробки деталі. В якості заготовки використовується лист прокатний 09Г2С (10*2000*6000мм). Тому, для виготовлення однієї перегородки потребуємо два листи сталі, котрі зваримо між собою.

Таблиця 5.1. Схема обробки

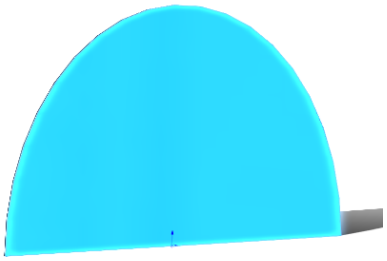
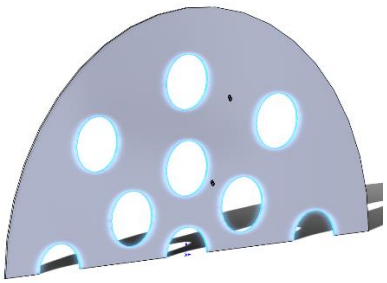
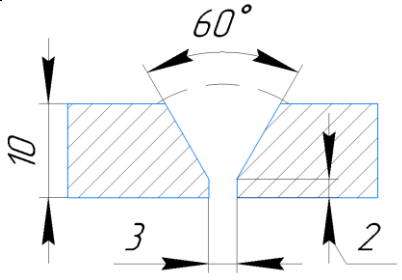
№	Зображення поверхні	Спосіб обробки
1		Операція різання
2		Операція різання
4		Операція зварювання

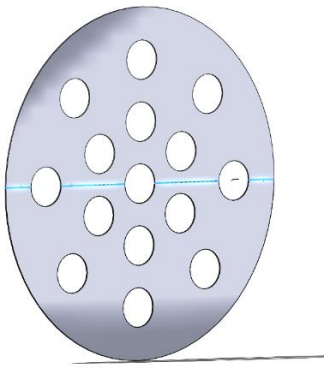
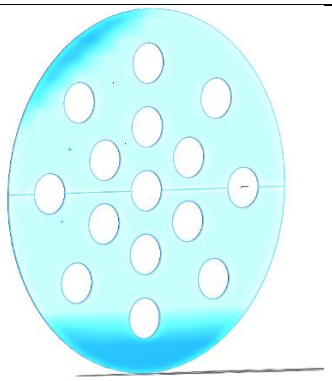
5		Операція шліфування

5.3. Проектування маршрутних технологічних процесів

Наступним кроком буде розробка маршруту обробки деталі. На основі геометричних характеристик даної перегородки та описану раніше технологічну послідовність оброблення поверхонь, систематизуємо інформацію та занесемо до Табл. 5.2.

Таблиця 5.2. Схема обробки

Номер операції	Назва	Вигляд	Інформація
001	Порізка листового прокату		Діаметр D=3200мм; Точність: ±0.02мм; Допуск: $Ø3200^{+0.02}_{-0.02}$
002	Операція різання		Діаметр D=360мм; Точність: ±0.02мм; Допуск: $Ø360^{+0.02}_{-0.02}$
003	Операція розділки кромок		V-образна форма скосу кромок.

004	Операція зварювання		Вид зварювального шва: стикове
005	Шліфування		Виконання шліфування зварних швів.

5.4. Короткий опис вибору верстатного обладнання

Для виконання лазерного різання листового металу та виконання отворів перфорації виберемо верстат для лазерного різання з ЧПУ Yangli серії GL, модель GL4020F. Даний верстат має наступні характеристики (Табл. 5.3.).

Таблиця 4.3. Характеристика Yangli GL4020F

Параметри		GL4020F
Макс. розмір листа	мм	4000*2000
Хід по осі X	мм	4500
Хід по осі Y	мм	2025
Хід по осі Z	мм	200
Точність позиціонування по осям X,Y	мм	0.02
Точність повторення осей X, Y	мм	±0.02
Макс. Швидкість переміщення по осям X, Y	м/хв	120
Потужність випромінювача	Вт	500/700/1000/2000/3000/4000/6000
Габарити верстата	м	11x5x2

Для виконання зварювання обох напівкругів перегородки використаємо зварювальний апарат IGBT Dnipro-M SAB-15DFB. Даний зварювальний апарат має такі характеристики, які занесемо до Табл. 5.4.

Таблиця 5.4. Характеристики GL4020F

Сумісні моделі кабелів	WS-3220A; WS-3216C
Призначення	Універсальне
Максимальна споживана потужність	6,15 кВА
Максимальна активна потужність	4260 Вт
Діапазон регулювання струму	20-150 А
Діаметр зварювального електрода	1,6-4 мм
Тип електрода	сталь/чавун/нержавіюча сталь

Для виконання шліфування зварювальних швів перегородки використаємо щіткову шліфмашину Eibenstock ESM1310. Даний апарат має такі характеристики, які занесемо до Табл. 5.5.

Таблиця 5.5. Характеристики Eibenstock ESM1310

Виробник	Eibenstock ESM1310
Потужність, Вт	1400
Оберти холостого ходу, об/хв	1300.. 3050
Розмір оснащення, мм	120
Напруга, В	220
Вага, кг	2,8

5.5. Висновок до розділу 5

Розроблено технологічний процес оброблення деталі, який реалізується на верстаті з ЧПУ для лазерної різки листового металу Yangli GL4020F. Сумарний час виготовлення однієї деталі 1440 хв. Для реалізації технологічного процесу використано зварювальний апарат IGBT Dnipro-M SAB-15DFB, щіткова шліфмашина Eibenstock ESM1310, загальною вартістю 1980000 грн.

РОЗДІЛ 6. ОХОРОНА ПРАЦІ

Тема дипломної роботи: «Демпфери коливань рідини у резервуарах». Даний розділ присвячен проведенню аналізу та опису заходів щодо забезпечення безпечних умов під час експлуатації резервуарів для перевезення нафтопродуктів. Оцінка можливих ризиків та потенційної небезпеки під час використання подібних резервуарі та передбачення заходів безпеки під час роботи обслуговуючого персоналу.

Серед небезпечних чинників можна виділити:

- Освітлення;
- Пожежонебезпека;
- Вибухонебезпека;
- Забруднення токсичними рідинами та парами;
- Фактори шуму та вібрації;

6.1. Характеристики приміщення та майданчику для естакад.

Обробка цистерн під час підготовки їх до наливу, ремонту та експлуатації виконується (в залежності від кліматичних умов) на відкритих естакадах або на естакадах, розташованих в приміщеннях, які мають необхідне обладнання та оснащення. В районах із розрахунковою зовнішньою температурою нижче мінус 30°С цистерни повинні оброблятися на естакадах, розміщених в закритих приміщеннях.

Естакади споруджуються у вигляді довгих галерей з експлуатаційним майданчиком, розташованим на висоті 3 – 3.5м, рахуючи від головки рейки. У торцях, а також уздовж естакад, на дістані не більше 100м один від одного встановлюють вогнетривкі сходи, кут нахилу яких не перевищує 60°. Ширина проходу не менше 1м.

Майданчики, де розташовані естакади, повинні бути встановленні на відстані не 30м від залізничної колій, найближчих станційних та тракційних колій, і не менше 50м від суміжних залізничних будівель і споруд. Ділянки, на яких проводиться оброблення цистерн повинні мати тверде покриття (цементобетонне,

асфальтобетонне тощо), яке не допускає проникнення нафтопродуктів у ґрунт відповідно до вимог НАПБ В.01.010-2009/510 [24].

Будівля, в якій розташовані естакади, обладнується витяжною загальною та місцевою, приливною і аварійною системами вентиляції. Під час експлуатації пристрої вентиляції повинні забезпечувати на робочих місцях такі концентрації, які не перевищують гранично допустимі.

6.2. Освітлення

Освітленість на робочому місці має бути достатньою для забезпечення комфортних умов роботи. Недостатня освітленість призводить до порушення зору робітника, що призводить до зниження уваги та до настання передчасної втомленості. Занадто яскраве освітлення викликає засліплення, роздратування та різь в очах. Неправильно встановлене джерело освітлення на робочому місці створює перепони для ефективної роботи: дезорієнтування працівника, утворення тіней, відблисків тощо. Відсутність правильно встановленого освітлення, недостатня кількість світильників, а також їх неправильне розміщення можуть призвести до утворення небезпечної ситуації на робочому місці.

Згідно з діючими нормами штучного освітлення об’єктів залізничного транспорту (НАОП 5.1.11-3.02-91) [25], освітлення естакад промивально-пропарувальних станцій, дезпром. станцій для обробки цистерн і промивки вагонів та естакад для наливу нафтопродуктів повинне бути не менше ніж 20 лк, встановлене на поверхні настилу естакади.

В приміщеннях, де відбувається експлуатація, ремонт та наливання вагонів-цистерн, необхідно застосовувати комбіноване освітлення. При недостатньому по нормам природне освітлення треба доповнити штучними джерелами світла.

В даному випадку, робота із цистернами відноситься до робіт низької точності, що відповідає розряду I – II зорової роботи.

У основних та допоміжних приміщеннях, а також на відкритих площадках, де можливе виділення парів та газів нафтопродуктів, світильники мають бути у вибухобезпечному виконанні. Світильники і світлові прорізи повинні очищатися по мірі свого забруднення.

6.3. Пожежонебезпека.

Під час роботи та експлуатації вагонів-цистерн, що призначені до перевезення нафтопродуктів, слід пам'ятати про правила забезпечення протипожежної безпеки. Приміщення, або відкритий майданчик, де відбувається процес обслуговування цистерн повинен відповідати нормам ДСТУ 8828:2019 [26].

В приміщеннях для роботи із цистернами, згідно із вимогами ДБН В.2.5-56:2014 [27] повинне бути забезпечено засобами пожежогасіння та пожежною сигналізацією, що повинна постійно підтримуватися у справному стані. Також, незалежно від встановлених засобів автоматичної сигналізації та пожежогасіння, на території та в приміщеннях повинні розміщуватись пожежна техніка та первинні засоби пожежогасіння.

Для забезпечення безпеки працівників, приміщення мають бути обладнанні автоматичними засобами контролю параметрів процесу, сигналізацією досягнення граничних значень та системами блокування, що запобігають виникненню аварійних ситуацій:

- Включення в роботу звукової і світлової сигналізації;
- Включення аварійної вентиляції;
- Зупинка компресорів, насосів та інших апаратів або включення в роботу аварійних засувок (відсікаючих клапанів), які припиняють надходження у технічне устаткування і комунікації виробничого приміщення пожежонебезпечних речовин.
- Викидання горючих газів або зливання ЛЗР та ГР з аварійного технологічного устаткування за межі виробничого приміщення або подачу флегматизаторів у технологічне устаткування і комунікації.

Будь які вогневі та зварювальні роботи на території дозволяється проводити на відстані 20м від каналізаційних колодязів і не менше 50м від відкритих нафтовловлювачів. Для забезпечення індивідуальної та загальної безпеки працівників, під час зварювальних та інших робіт на естакаді, місце робіт необхідно попередньо звільнити від легкозаймистих та вогненебезпечних рідин.

Палити дозволяється тільки в спеціально обладнаних для цього приміщеннях, які погоджені із органами державного пожежного нагляду та СЕС залізниць та позначені відповідними знаками.

6.4. Вибухонебезпека.

Визначення категорії приміщення за вибухопожежною небезпекою визначається з урахуванням з урахуванням показників пожежовибухонебезпечності речовин та матеріалів, що там знаходяться та їх кількість. Згідно до ДСТУ Б В.1.1-36:2016 [28], приміщення для роботи із цистерна для перевезення нафтопродуктів можна віднести до категорії Б.

Для забезпечення безпеки робітників, як і для забезпечення протипожежної безпеки, приміщення повинні забезпечуватися автоматичними засобами сигналізації, пожежогасіння та засобами автоматичного контролю вибухонебезпечних концентрацій речовин у повітрі.

В виробничих та складських приміщеннях, в яких використовують або зберігають речовини, які здатні до утворювання вибухонебезпечних концентрацій парів та газів, необхідно встановлювати газоаналізатори для контролю стану повітряного середовища. При відсутності автоматичних газоаналізаторів, необхідно проводити регулярні аналізи повітряного середовища іншими приладами.

Під час проведення технологічних процесів необхідно:

- Періодичний контроль за станом повітря робочої зони.
- Періодичний контроль функціонування систем сигналізації і пожежогасіння.
- Своєчасне вилучення вибухонебезпечних відходів виробництва.

Також, може створюватися хімічна лабораторія, яка оснащена обладнанням і приладами за переліком, затвердженим Центральною санітарно-епідеміологічною станцією на залізничному транспорті. Лабораторія повинна визначити найменування залишків нафтопродуктів, які раніше перевозилися в котлах цистерн, перевіряти їх на вибухонебезпеку газоповітряного середовища і визначати концентрацію шкідливих речовин у повітрі робочої зони.

6.5. Забруднення токсичними речовинами та парами

Для забезпечення безпеки під час роботи із рідинами в цистернах, необхідно встановити окремі ємності для збирання і зберігання залишків нафтопродуктів,

баласту, який забруднений та просочений нафтопродуктами, шламу та інших матеріалів.

Приміщення, в яких виконуються роботи з цистернами, а саме перекачування виробничих стічних вод, які містять шкідливі гази та утворюють вибухонебезпечні суміші, необхідно обладнати механічною припливно-витяжною вентиляцією. Забирання повітря даною системою повинно бути 10м вбік або 6м вниз від небезпечної зони, а подача повітря у тамбур-шлюз має бути окремою зі створенням надлишкового тиску 20Па.

На коліях, де виконується заправка клапанів зливних приладів цистерн, мають бути встановлені жолобами, або іншими пристроями для уловлення залишків нафтопродуктів, а люки та приямки на відстійниках і трубопроводах мають бути постійно закриті кришками.

Для того, щоб безпечно виконувати свої робочі функції, працівники, що безпосередньо пов’язані з обробкою цистерн, мають бути забезпечені відповідним спецодягом, спецвзуттям, натільною білизною та іншими засобами індивідуального захисту (ЗІЗ) у відповідності з нормами НПАОП 60.1-3.30-80 [29], а також первинними засобами пожежогасіння у відповідності з НАПБ 03.004-2002 [30] та рятувальним спорядженням.

6.6. Фактори шуму та вібрації

Під час експлуатації вагонів-цистерн, вони створюють шум та вібрації, що можуть негативно впливати як на здоров’я працівників, так на оточуюче середовище. У деяких випадках вібрація та шум може викликати дискомфорт для персоналу та оточуючих. А також потенційно нашкодити цілісності навколишніх конструкцій.

Для забезпечення безпеки та здорового функціонування робітників під час роботи із цистернами для перевезення нафтопродуктів, необхідно на робочому місці забезпечити виконання норм ДСН №3.3.6.037-99 [31] та ДСН №3.3.6.039-99 [32]. Рівень шуму та вібрацій не повинен перевищувати значень, вказаних в цих документах.

Для управління шумом та вібрацією, пов’язаних за вагонами-цистернами, застосовуються різні технічні рішення. Використання спеціальних систем підвіски, амортизаторів, ізоляційних матеріалів тощо. Це дозволяє знизити рівень переданого шуму та вібрації. Крім того, необхідно проводити регулярні перевірки та обслуговування цистерн та колії, що дозволяє вчасно виявити та усунути можливі проблеми, що можуть призвести до збільшення шуму та вібрації.

6.7. Висновок до розділу

В даному розділі дипломної роботи було розглянуто питання охорони праці під час експлуатації вагонів-цистерн. Була проведена робота по аналізу наявних та актуальних норм для забезпечення профілактики шкідливих та небезпечних факторів для працівника.

У ході дослідження біли визначені основні вимоги щодо забезпечення повної безпеки під час робочого процесу, основні положення та фактори протидії утворенню або вирішенню небезпечних ситуацій під час ремонту, обслуговування та використання вагонів-цистерн для перевезення нафтопродуктів.

Зазначено необхідність використання системного підходу до охорони праці, забезпечення інформаційної свідомості робітників естакад, контролювання правильного функціонування всіх робочих процесів та проведення регулярних замірів та перевірок для забезпечення повної безпеки виробників та приладів.

Підсумовуючи, даний розділ охорони праці є винятковою частиною роботи, що дозволяє звернути увагу на підвищену небезпеку при роботі із цистернами з врахуванням актуальних вимог згідно з законодавством України.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У ході виконання дипломної роботи, було досліджено явище коливань рідини у резервуарі та на основі теоретичних досліджень, було розроблено демпфуючий елемент – перегородка. Для досягнення мети було виконано наступне:

- Проведено теоретичний аналіз літератури та джерел інформації.
- Проведено моделювання дії коливань рідини усередині резервуарів.
- Проведено порівняння отриманих даних щодо коливань рідини у резервуарі зі встановленими перегородками та без них.
- Розроблено рекомендації з питань охорони праці.

Виконання даної кваліфікаційної роботи дозволило створити перегородку, що дозволяє контролювати коливання рідини усередині резервуару, знижуючи негативні наслідки під час перевезення рідких вантажів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. В.А. Ковальов, Вей Ченьюй. Структура внутрішніх потоків в'язкої рідини у резервуарах з демпфуючими перегородками. */Mech. Adv. Technol. Vol. 6, No. 3, 2022, pp. 309-316.*
2. Linlin Duan *et al*, "Numerical study of the liquid sloshing in the cylindrical tank with baffles". */J. Phys.: Conf. Ser., 1985, 012050, 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/1985/1/012050.*
3. M.T. Korang, S. Rakheja and I. Stiharu, "Three-dimensional analysis of transient slosh within apartly-filled tank equipped with baffles". */Vehicle System Dynamics, Vol. 45, No. 6,2007, pp. 525-548. DOI: 10.1080/00423110601059013.*
4. O. Ugur, GBilici and H. Akyıldız, "Liquid sloshing in a two-dimensional rectangular tank: A numerical investigation with a T-shaped baffle", *Ocean Engineering,* 187, 106183, 2019. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.106183
5. L. Ren *et al*., "Numerical Modeling of Coupled Surge-Heave Sloshing in a Rectangular Tank with Baffles". */Shock and Vibration Hindawi 2021. DOI: 10.1155/2021/5545635.*
6. M.A. Xue, J. Zheng and P. Lin, "Numerical Simulation of Sloshing Phenomena in Cubic Tank with Multiple Baffles". */Hindawi Publ. Corp. J. of Applied Math., 2012. DOI: 10.1155/2012/245702.*
7. S. Hasheminejad and M. Mohammadi, "Active sloshing control in a smart flexible cylindrical floating rooftank". */Journal of Fluids and Structures, 66, pp. 350-381, 2016. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2016.07.022.*
8. Z. Zhang *et al*., "Investigations on sloshing mitigation using elastic baffles by coupling smoothed finite element method and decoupled finite particle method". */Journal of Fluids and Structures, 94, April 2020. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs.2020.102942.*
9. U. Arif *et al*., "Suppression of hydrodynamic sloshing in liquefied natural gas tank with floating baffle: Experimental and numerical studies". /in IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 463(1), 2020. DOI: 10.1088/1755-1315/463/1/012111.
10. J.R. Cho and S.Y. Lee. "Dynamic analysis of baffled fuel-storage tanks using ALE finite element method". /*Int. J. Numer. Meth. Fluids* 2003; 41-185-208.
11. Ch. Zhang, "Application of an improved semi-Lagrangian procedure tofully-nonlinear simulation of sloshing in non-wall-sided tanks". */Applied Ocean Research 51 (2015) 74-92.*
12. Dekýš, P. Kopas, M. Sapieta, O. Števka, "Detection of deformation mechanisms using infrared thermography and acoustic emission". */Applied Mechanics and Materials 474 (2014) 315-320.*
13. Hirt CW, Amsden AA, Cook JL. "An arbitrary Lagrangian–Eulerian computing method for all flow speeds". */Journal of Computational Physics 1974, 14:227-253.*
14. Belytschko T, Kennedy JM. "Computer models for subassembly simulation.". */Nuclear Engineering Design 1978; 49:17-38.*

15. Benson DJ. “An efficient, accurate, simple ALE method for nonlinear finite element programs”. */Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering 1989; 72:305-350.*
16. Souli M, Ouahsine A, Lewin L. “ALE formulation for fluid-structure interaction problems”. */Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering 2000; 190:659-675.*
17. Bathe KJ. “Finite Element Procedures”. */Prentice-Hall: Singapore, 1996.*
18. Hayashi M, Hatanaka K, Kawahara M. “Lagrangian finite element method for free surface Navier–Stokes flow using fractional step methods”. */International Journal for Numerical Methods in Fluids 1991; 13:805-840.*
19. Chorin AJ. “Numerical solution of Navier-Stokes equations”. */Mathematics of Computation 1968; 22:745-762.*
20. Nomino C, GiudiceSD. “Finite element analysis of turbulent forced convection in lid-driven rectangular cavities”. /International Journal for Numerical Methods in Engineering 1988; 25:313-329.
21. Newmark HN. “A method of computation for structural dynamics”. */ASCE Journal of Engineering Mechanics Division 1959; 85:67-94.*
22. “Таблицы калибровки железнодорожных цистерн”. */М:ТРАНСИНФО, 2007. – 156с., с.78.*
23. Характеристика материала 09Г2С [Електронний ресурс] - http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=120
24. НАПБ В.01.010-2009/510: “Правила пожежної безпеки на залізничному транспорті” [Електронний ресурс] - http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=29327
25. НАОП 5.1.11-3.02-91: “Норми штучного освітлення об’єктів залізничного транспорту” [Електронний ресурс] - http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25975
26. ДСТУ 8828:2019: “Пожежна безпека. Загальні положення” [Електронний ресурс] - http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=82138
27. ДБН В.2.5-56:2014: “ Системи протипожежного захисту. Зі зміною № 1” [Електронний ресурс] - http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=59526
28. ДСТУ Б В.1.1-36:2016: “Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою” [Електронний ресурс] - http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=65419
29. НПАОП 60.1-3.30-80: “Типовые отраслевые нормы бесплатной выдачи специальной одежды, специальной обуви и других средств индивидуальной защиты рабочим и служащим железнодорожного транспорта предприятий (железнодорожный внутризаводской)” [Електронний ресурс] - http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=47413
30. НАПБ 03.004-2002: “Норми оснащення об`єктів і рухомого складу залізничного транспорту пожежною технікою та інвентарем” [Електронний ресурс] - http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=64088

31. ДСН №3.3.6.037-99: “Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку” [Електронний ресурс] - http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=48147
32. ДСН №3.3.6.039-99: “Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації” [Електронний ресурс] - http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=6372