

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ
КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЇ ГІДРОАЕРОМЕХАНІКИ І МЕХАНОТРОНІКИ

«На правах рукопису»
УДК 62-9

До захисту допущено:
В.о.завідувача кафедри ПГМ
Олег ЛЕВЧЕНКО
“ ” 2024 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-професійною програмою «Автоматизовані та роботизовані
механічні системи»**

зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»

на тему: Демпфірування інерційних течій рідини в резервуарі з
внутрішніми перегородками

Виконав(ла) : студент(ка) 2 курсу, групи МА-31мп
(шифр групи)

Бардін Владислав Андрійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Науковий керівник д.т.н., професор Ковальов Василь Анатолійович
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент(ка)

(підпис)

Київ – 2024 рік

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

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійна програма «Автоматизовані та роботизовані механічні системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри ПГМ

_____ Олег ЛЕВЧЕНКО

« ____ » _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту(ці)
Бардіна Владислава Андрійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації: Демпфірування інерційних течій рідини в резервуарі _____ з внутрішніми перегородками _____
науковий керівник дисертації Ковальов Василь Анатольович, д.т.н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «07» листопада 2024 р. № 5000-с

2. Термін подання студентом(кою) дисертації _____

3. Об'єкт дослідження Гнучка внутрішня перегородка в резервуарі _____

4. Вихідні дані Дослідження демпфірування інерційних течій рідини в резервуарах гнучкими внутрішніми перегородками, еліпсоїдний резервуар об'ємом 27 640 літрів, рідина – дизельне паливо, матеріал перегородки – TPU (Термопластичний поліуретан), мінімальне прискорення резервуара 2 м/с^2 , максимальне прискорення резервуара $4,2 \text{ м/с}^2$

5. Перелік завдань, які потрібно розробити Визначення актуальності обраної теми; проведення аналізу існуючих теоретичних та практичних досліджень; створення математичної моделі на основі методу ALE; створення та моделювання досліджуваного явища у середовищі SolidWorks; проведення паралельних симуляцій досліджуваного явища демпфування інерційних потоків та порівняння отриманих результатів; розроблення стартап проекту _____

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу _____
A1 - 6 листів

7. Орієнтовний перелік публікацій _____

8. Дата видачі завдання «18» жовтня 2024 р. _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Проведення загального літературного аналізу із визначення актуальності, доцільності та потенційної користі теми магістерської дисертації	18.10.2024-18.11.2024	
2	Побудова об'ємної 3D моделі досліджуваного резервуара в середовищі SolidWorks	19.11.2024-24.11.2024	
3	Побудова математичної моделі для проведення симуляції в програмному пакету Ansys (Explicit Dynamics)	25.11.20.24-1.12.2024	
4	Проведення аналізу отриманих результатів дослідження	1.12.2024-4.12.2024	
5	Розроблення стартап-проекту	4.12.2024-6.12.2024	
6	Оформлення графічного матеріалу у форматі плакатів A1	6.12.2024-10.12.2024	

Студент (ка)

Владислав, БАРДІН

Керівник

Василь, КОВАЛЬОВ

Пояснювальна записка до магістерської дисертації

на тему: Демпфірування інерційних течій рідини в резервуарі з
внутрішніми перегородками

АНОТАЦІЯ

Магістерська дисертація «Демпфірування інерційних течій рідини в резервуарі з внутрішніми перегородками» присвячена дослідженню та розробці методів демпфірування коливань рідини за допомогою гнучких перегородок. Інерційні течії, що виникають під час руху резервуарів, заповнених рідиною, можуть створювати небезпеку, знижуючи стабільність транспортних засобів. Тому актуальним є пошук ефективних способів демпфірування цих течій.

У роботі розглядаються особливості демпфірування за допомогою гнучких і жорстких внутрішніх перегородок, принципи їхньої дії та ефективність у різних умовах руху. Розроблено математичну модель на основі методу ALE та проведено комп'ютерне моделювання в середовищі SolidWorks Flow Simulation. Виконано порівняльний аналіз ефективності гнучких і жорстких перегородок у процесі демпфірування інерційних течій рідини.

Метою дослідження є визначення ефективності гнучких перегородок для підвищення безпеки транспортування органічних і неорганічних рідин. Результати роботи можуть бути використані для проектування та модернізації резервуарів, що застосовуються у транспортних системах та промислових процесах.

Магістерська дисертація загальним обсягом 96 сторінки, містить 51 рисунок, 25 таблиць та 52 джерело за переліком посилань.

Ключові слова: демпфірування, інерційні течії, гнучкі перегородки, жорсткі перегородки, транспортування, демпфер, SolidWorks.

ABSTRACT

Master's Thesis «Damping of inertial liquid flows in a tank with internal baffles» focuses on the study and development of methods for damping fluid oscillations using flexible partitions. Inertial flows occurring during the movement of liquid-filled tanks can pose safety risks by reducing the stability of transport vehicles. Therefore, finding effective ways to dampen these flows is highly relevant.

The thesis examines the characteristics of damping using flexible and rigid internal partitions, their principles of operation, and their efficiency under various movement conditions. A mathematical model based on the ALE method has been developed, and computer simulations were performed in the SolidWorks Flow Simulation environment. A comparative analysis of the effectiveness of flexible and rigid partitions in damping inertial fluid flows was conducted.

The objective of the research is to determine the efficiency of flexible partitions for improving the safety of transporting organic and inorganic liquids. The results of the study can be used for the design and modernization of tanks employed in transport systems and industrial processes.

The master's thesis is 96 pages long and contains 51 figures, 25 tables, and 52 references.

Keywords: damping, inertial flows, flexible partitions, rigid partitions, transportation, damper, SolidWorks.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. МЕТОДИ ДЕМПФУВАННЯ ІНЕРЦІЙНИХ ТЕЧІЙ У РЕЗЕРВУАРАХ	11
1.1. Огляд методів демпфірування інерційних течій рідини в резервуарах....	12
1.1.1. Жорсткі перегородки.....	13
1.1.2. Демпфуючі елементи.....	14
1.1.3. Гнучкі перегородки.....	15
1.1.4. Перфоровані перегородки.....	17
1.1.5. Плаваючі платформи	18
1.2. Загальний огляд методів чисельного моделювання інерційних течій.	20
1.2.1. Метод кінцевих елементів (МКЕ)	20
1.2.2. Метод граничних елементів (ВЕМ)	22
1.2.3. Метод згладжених часток (SPH)	24
1.2.4. Метод кінцевих різниць (МКР)	26
Висновок	28
РОЗДІЛ 2. ОГЛЯД АКТУАЛЬНОЇ ЛІТЕРАТУРИ. ПОЧАТКОВА ПАРАМЕТРИЗАЦІЯ ДОСЛІДЖУВАЛЬНОГО ОБ'ЄКТУ	30
2.1. Порівняльний аналіз жорстких і гнучких перегородок	30
2.2. Загальні відомості та характеристики досліджуваного резервуара.....	44
Висновок	53
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ, ПРОВЕДЕННЯ МОДЕЛЮВАННЯ ІНЕРЦІЙНИХ ТЕЧІЙ РІДИНИ У РЕЗЕРВУАРІ З ГНУЧКИМИ ПЕРЕГОРОДКАМИ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ ДАНИХ.....	54
3.1. Математична модель резервуара та процесів течії рідини	54
3.2. Дослідження та моделювання поведінки інерційних течій у резервуарі....	63
3.3. Аналіз отриманих результатів	69
3.5. Висновок	74
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ.....	75
4.1. Опис ідеї проекту	75

4.2. Технологічний аудит.....	77
4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	79
4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту	86
4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	90
4.6. Висновок	95
ВИСНОВКИ.....	96
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	98

ВСТУП

Актуальність дослідження коливальних процесів у резервуарах з рідиною визначається широким застосуванням подібних систем у різних галузях промисловості та транспортування, де наявність інерційних течій рідини може призводити до небажаних коливань та втрати стійкості руху транспортного засобу. В умовах значного прискорення або різкої зміни швидкості, рідина в резервуарі може утворювати сильні коливальні процеси, що значно впливає на стійкість, керованість та безпеку транспортного засобу чи конструкції в цілому.

Інерційні течії, викликані рухом рідини в резервуарах, особливо складні для демпфірування через складну природу внутрішніх взаємодій та високий рівень енергії, що акумулюється в рідині під час таких процесів. Традиційні методи стабілізації коливань, такі як жорсткі перегородки або системи компенсації інерційних сил, мають обмежену ефективність і часто потребують значного простору або суттєвих змін конструкції резервуарів. В останні роки все більше уваги приділяється дослідженням застосування гнучких внутрішніх перегородок як засобу демпфірування інерційних течій, які дозволяють не тільки знижувати амплітуду коливань, але й ефективно адаптуватися до змін умов середовища та руху.

Дана магістерська робота присвячена вивченню впливу гнучких внутрішніх перегородок на процес демпфірування інерційних течій у рідинних резервуарах. Метою дослідження є аналіз ефективності гнучких перегородок у зменшенні амплітуди коливань рідини та зниженні інерційних навантажень на конструкцію резервуара. Отримані результати можуть мати практичне значення для проектування та експлуатації резервуарів, що використовуються в транспортній та інших галузях.

Метою даного дослідження є розробка наукових основ і методології демпфірування інерційних течій рідини в резервуарах з гнучкими внутрішніми перегородками. Зокрема, дослідження спрямоване на зменшення амплітуди

коливань рідини та зниження інерційних навантажень на конструкцію резервуара шляхом впровадження гнучких елементів, які здатні ефективно адаптуватися до змінних умов експлуатації. Для досягнення цієї мети передбачається виконати низку послідовних завдань. По-перше, необхідно провести аналіз існуючих методів демпфірування інерційних течій рідини в резервуарах, зокрема таких, що використовують жорсткі та гнучкі перегородки, а також оцінити переваги й обмеження кожного з них. Це дозволить визначити основні недоліки та сфери застосування різних методів і обґрунтувати доцільність використання гнучких перегородок у певних умовах.

Далі потрібно розробити математичну модель процесу демпфірування інерційних течій рідини в резервуарах з гнучкими внутрішніми перегородками. Ця модель повинна описати динамічну взаємодію рідини та гнучких елементів у резервуарі за умов змінних навантажень, що є ключовим фактором для розуміння процесу демпфірування. Наступним кроком буде дослідження впливу ключових параметрів гнучких перегородок, таких як жорсткість, товщина, форма і матеріал, на ефективність демпфірування. Це дозволить визначити оптимальні характеристики перегородок, залежно від умов експлуатації, і забезпечити адаптацію конструкції до специфічних навантажень.

Для перевірки адекватності розробленої математичної моделі, а також підтвердження ефективності використання гнучких перегородок у демпфіруванні інерційних течій рідини, необхідно виконати чисельне моделювання і провести експериментальні дослідження. Це сприятиме зниженню ризиків ідентифікації можливих відхилень від передбачуваних характеристик гнучких перегородок на етапі проектування. На основі отриманих результатів буде розроблено рекомендації щодо проектування резервуарів з гнучкими перегородками, що спрямовані на зниження інерційних навантажень і підвищення стійкості конструкцій, які містять рідину. Реалізація зазначених завдань дозволить отримати нові дані щодо ефективного зниження інерційних коливань у резервуарах з рідиною, що має важливе значення для підвищення безпеки і надійності транспортних та промислових систем.

РОЗДІЛ 1. МЕТОДИ ДЕМПФУВАННЯ ІНЕРЦІЙНИХ ТЕЧІЙ У РЕЗЕРВУАРАХ

Сьогоденний розвиток різних галузей промисловості характеризується збільшенням обсягів транспортування різних об'єктів та матеріалів: рідких промислових матеріалів, як хімічних речовин, різних видів паливо та реагентів. Подібні рідини, в залежності від їх обсягу є джерелом нестійкості, тому вже протягом багатьох десятиліть, науково-інженерна спільнота досліджує замкнені течії в'язкої нестисливої рідини у частково заповнених резервуарах різної геометрії. Під час руху об'єкта рідина в резервуарі часто утворює неконтрольовані хвилеподібні течії, що виникають навколо однієї або кількох осей симетрії. Це призводить до резонансних силових впливів на стінки резервуара. Через значні інерційні маси рідини такі течії можуть стати джерелом нестабільності або навіть спричинити аварії, наприклад, на суднах-танкерах, залізничних цистернах чи космічних апаратах [1].

За останні два десятиліття, кількість опублікованих робіт (Рис. 1.1.), присвячених дослідженню гідродинаміки коливань рідини та їх цитування суттєво зросла, як демонструє робота китайських вчених Цзінь-Хай Чжен, Мі-Ан Сюе, Пен Доу та Юй-Мен Хе з університету Хохай, що свідчить, що дана проблематика залишається однією з провідних тем досліджень у багатьох галузях [2].

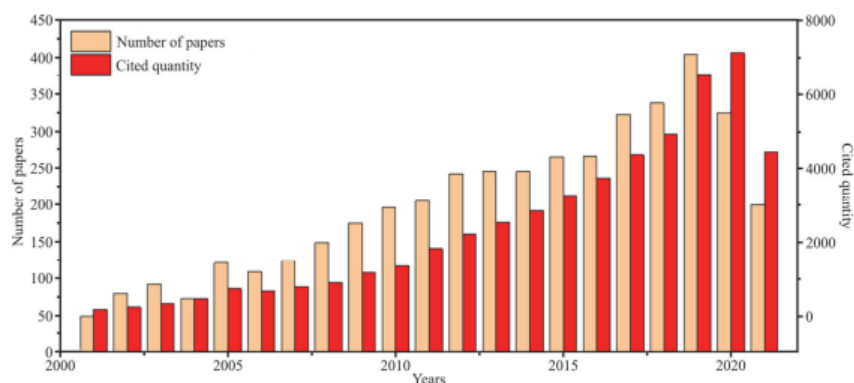


Рис. 1.1. Кількість опублікованих статей та кількість їх цитувань, знайдених у базі даних Web of Science [2]

Найбільш поширеним методом стабілізації є використання жорстких внутрішніх перегородок. Вони розділяють об'єм рідини, обмежуючи її рух, і таким чином знижують інтенсивність коливань [3-4]. Однак жорсткі перегородки мають свої мінуси: вони займають багато місця, важкі, складні в монтажі та недостатньо гнучкі для різних режимів експлуатації.

Тому стає актуальним пошук альтернативних рішень, які були б ефективнішими, адаптивнішими й легшими. Таким можна назвати гнучкі внутрішні перегородки, але для більш детального аналізу, необхідно також розглянути існуючі методи демпфірування рідини, основні математичні моделі розрахунку внутрішніх процесів в резервуарах та виконати аналіз наукових праць та досліджень щодо порівняння ефективності жорстких перегородок з гнучкими.

1.1. Огляд методів демпфірування інерційних течій рідини в резервуарах

Розв'язання проблеми інерційних течій в резервуарах є одним із ключових напрямків інженерії, оскільки рух рідини всередині ємності створює додаткові навантаження, що негативно впливають на стійкість та безпеку конструкцій. Це питання особливо актуальне для транспортних систем, де коливання рідини можуть ускладнювати керування та підвищувати ризик аварій, а також для промислових резервуарів, де стабільність рідини необхідна для підтримання технологічної безпеки. Демпфірування інерційних течій дозволяє зменшити амплітуду коливань, підвищити стійкість конструкцій та знизити ризик перевантаження.

Тому необхідно розглянути існуючі методи демпфування інерційних течій рідини в резервуарах, що дозволить провести більше детальний порівняльний аналіз ефективності гнучких внутрішніх перегородок з іншими конфігураціями.

1.1.1. Жорсткі перегородки

Жорсткі перегородки широко використовуються для зменшення коливань рідини в частково заповнених резервуарах та контейнерах для перевезень рідких матеріалів. Їх основне завдання – зменшення амплітуди коливань, пікових значень тиску тиску та пов'язаних із цим гідродинамічних сил, що можуть спричиняти нестабільність резервуара, пошкодження його конструкції та впливають на безпеку суден і транспортних засобів [5].

На сьогоднішній день існує багато досліджень відносно розташування внутрішніх перегородок та їх ефективності в процесах демпфування коливань рідини. Одним із найпоширеніших засобів зменшення коливань рідини є вертикальні перегородки [6], як зображено на Рис. 1.2. Дослідження Д. Ліу та П. Лінь [7] встановили, що вертикальні перегородки більш ефективно зменшують амплітуду коливань, ніж горизонтальні. Дослідження Г. Ак'їлдіз [8] дослідив, що навіть невелика висота вертикальної перегородки може сприяти демпфуванню коливань через блокуючі ефекти й в'язкість стінок перегородок. Юнг та інші [9] зазначили, що зростання висоти перегородки послаблює утворення вихрів, зменшуючи тим самим її ефективність.

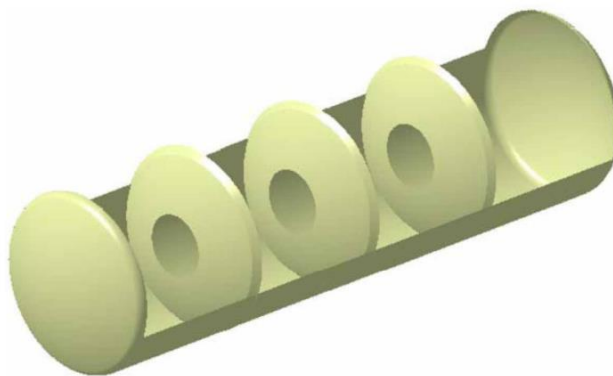


Рис. 1.2. Циліндричний бак з вирізом у стінці з трьома однонасадковими перегородками. [6]

Також, треба зазначити, що незважаючи на розповсюдження вертикальних перегородок, також використовуються і інші типи розташування перегородок – горизонтальні та кільцеві. Кільцеві перегородки особливо ефективні для

поглинання енергії на стінках резервуара [10]. Також, проведений в 2008 досліді Малекі та Зіяейфар [11] показали, що кільцеві перегородки краще зменшують осциляції рідини, ніж вертикальні лопатеві перегородки.

1.1.2. Демпфуючі елементи

Зі збільшенням об'ємів споживання сирої нафти, морська та океанічна галузь перевезень рідин набуває дедалі більшого значення. Хитання рідини та рух вільної поверхні впливають не лише на динаміку потоку всередині резервуара, але й на міцність самої конструкції. Сильне хитання може призвести до перекидання судна через втрату стійкості. Для зменшення коливань зазвичай використовуються горизонтальні та вертикальні перегородки. Проте традиційні перегородки мають один загальний недолік: вони є стаціонарними елементами танкера, а отже, залишаються незмінними для конкретного танкера, незалежно від зміни стану моря. Такі перегородки можуть бути ефективними лише в певних умовах, а в інших умовах вони можуть виявитися непотрібними.

Тому [12] впровадили альтернативне рішення щодо розміщення перегородок у резервуарах, яке можна було б змінювати залежно від стану моря (Рис. 1.3.). Їх основною метою дослідження було проведення аналізу і моделювання несталих перегородок, які можна змінювати в залежності від коливань.

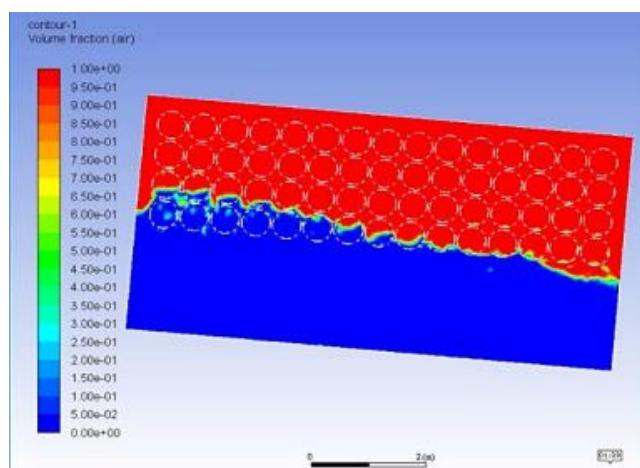


Рис. 1.3. 2D симуляція коливань рідини з кульковими перегородками [12]

Коли в резервуар для перевезення рідини встановлюються кульові перегородки, вони утворюють так звану стільникову структуру з багатьма невеликими гладкими поверхнями під різними кутами. На Рис. 1.4. зображена продукція новозеландської компанії Promax та можливого використання кульових перегородок всередині резервуара. Вони руйнують хвилі всередині резервуара, розсіюють енергію та запобігають ефекту поштовху, який характерний для резервуарів без перегородок. Кульові перегородки контролюють рух рідини, що зменшує інтенсивність динамічного навантаження на стінки резервуара.

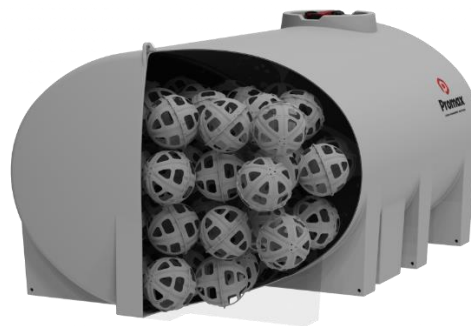


Рис. 1.4. Приклад демпфуючих елементів (плаваючі кульки) в резервуарі від компанії Promax Liquid Management Solutions [13]

1.1.3. Гнучкі перегородки

Гнучкі перегородки є достатньо інноваційним методом для контролю коливань рідини у резервуарах, що знаходяться в русі або зазнають зовнішніх збурень. В сьогоденні, подібні перегородки активно використовують в багатьох інженерних галузях, включаючи зберігання зрідженого природного газу (LPG), паливні баки транспорту або космічних апаратів [14-15].

Основною метою застосування гнучких перегородок (Рис. 1.5.) є зменшення амплітуди коливань вільної поверхні рідини, що, у свою чергу, знижує навантаження на стінки резервуара і зменшує ризики пошкодження конструкції [16]. Такі перегородки також здатні змінювати розподіл гідродинамічного тиску в резервуарі, забезпечуючи стабільність системи.

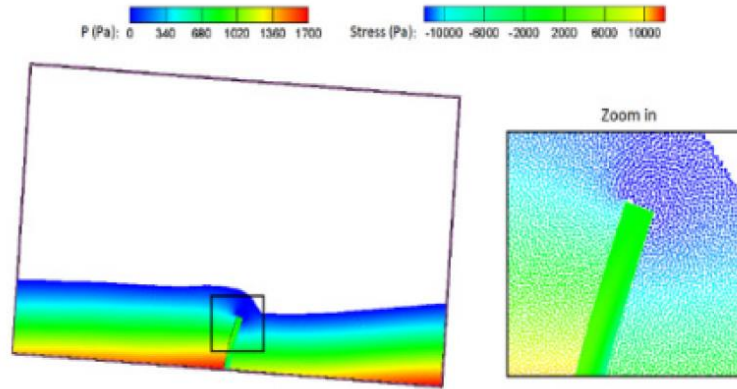


Рис. 1.5. Поле тиску рідини та напружень пружної перегородки [16]

Актуальні дослідження, що проводяться з метою аналізу функціональних переваг гнучких перегородок показують, що вони зменшують висоту хвиль та покращують стійкість конструкції в резервуарах зрідженого природного газу. Також, в роботі [14-15], де проводились експерименти з резервуарами зі встановленими всередині гнучкими кільцевими перегородками (Рис 1.6.), було продемонстровано їх ефективність у зниження коливань рідини.

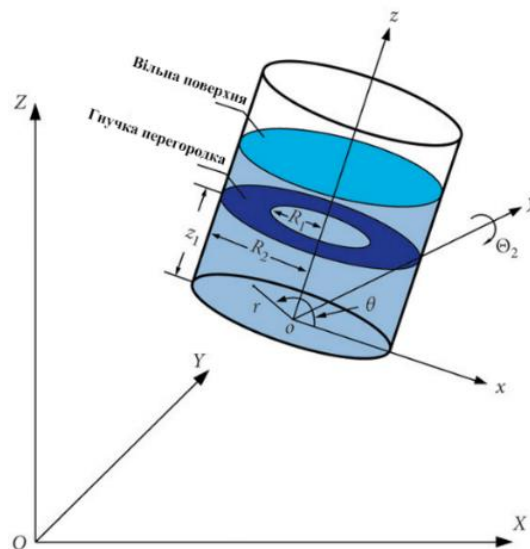


Рис. 1.6. Циліндричний резервуар з гнучкою перегородкою при кільцевих збудженнях [14]

Тому, гнучкі перегородки мають значний потенціал у зменшенні ризиків, пов'язаних із коливаннями рідини у великих резервуарах. Вони можуть використовуватися для оптимізації конструкцій нових резервуарів, а також для модернізації існуючих систем. Подальші дослідження спрямовані на розробку

методик для багатокомпонентних систем із кількома гнучкими перегородками, що дозволить підвищити їхню ефективність у складних умовах.

1.1.4. Перфоровані перегородки

Перфоровані перегородки використовуються, як і інші типи перегородок, в резервуарах із частковим заповненням та у танкерах для перевезень LNG/LPG. Ці перегородки мають отвори в своїй конструкції, що дозволяє рідині частково проходити крізь них, створюючи додаткове демпфування за рахунок опору потоку.

Дослідження показують [17], що перфоровані перегородки ефективно зменшують амплітуду хвилювання рідини, особливо у випадках, коли частота зовнішніх збурень близька до резонансної частоти системи (Рис. 1.7.).

Перфоровані перегородки не тільки знижують тиск на стінки резервуара, а й зменшують тривалість перехідного процесу хвилювання [18]. Вони сприяють більш рівномірному розподілу енергії у резервуарі завдяки потоковому опору, створюючи додаткове демпфірування за рахунок утворення завихрень та розсіювання енергії (Рис. 1.8.).

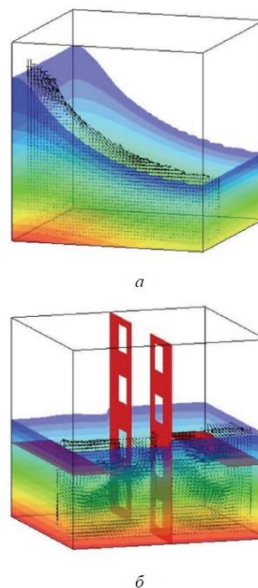


Рис. 1.7. Результати застосування вертикальних перфорованих жорстких перегородок (а) та периферійних горизонтальних конструкцій (б). [17]

Експериментальні дослідження підтверджують, що розташування, форма та діаметр отворів у перфорованих перегородках суттєво впливають на їх ефективність. Йоннес та інші [19] показали, що верхні вертикальні перегородки з отворами є найбільш ефективними для зниження хвилювання в заряджених резервуарах.

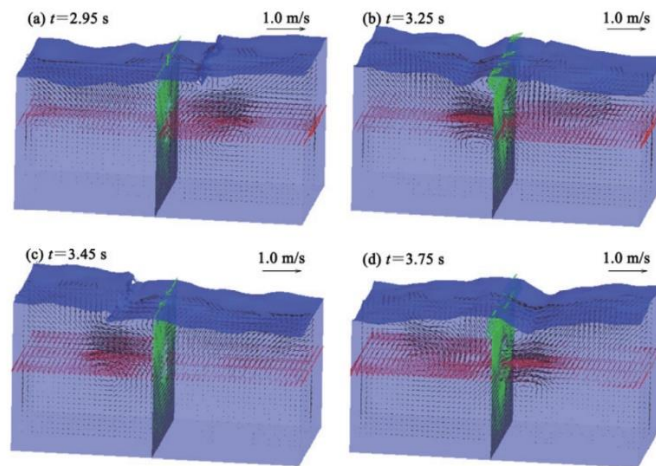


Рис. 1.8. Вільна поверхня та поля швидкості через центр отвору для коливань рідини в прямокутному резервуарі з перфорованою вертикальною перегородкою. [18]

Таким чином, перфоровані перегородки є ефективним інженерним рішенням для контролю хвилювання рідини, оскільки здатні забезпечити баланс між демпфіруванням рідини, що важливо для безпечного транспортування рідин у морських умовах.

1.1.5. Плаваючі платформи

Плаваючі перегородки є достатньо інноваційними пристроями для демпфування коливань рідини, що виникають під час транспортування різних видів рідин, як, наприклад, зрідженого природного газу (ЗПГ) в резервуарах [20]. В порівнянні з традиційними фіксованими перегородками, плаваючі перегородки мають переваги завдяки своїй здатності рухатися під дією рідини, завдяки чому знижується навантаження на стінки резервуару та підвищується безпека перевезень рідини (Рис. 1.9.).

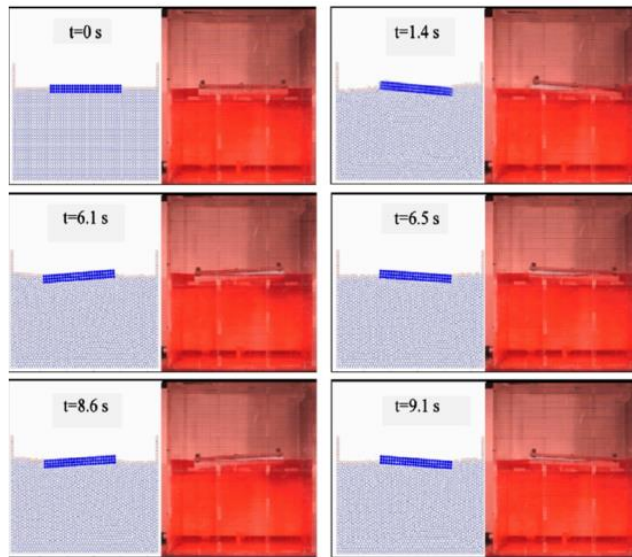


Рис. 1.9. Порівняння геометрії вільної поверхні рідини за результатами чисельного моделювання та фізичного експерименту [20]

Експериментальні дослідження [21], продемонстрували, що плаваючі перегородки значно знижують тиск коливань рідини, особливо при низькому рівні заповнення резервуару (Рис. 1.10.). Також було досліджено вплив плаваючих елементів із піноматеріалів, які функціонують як плаваючі перегородки [22]. Також, запропонований тип перегородки (CFB) дозволяє рухатися під дією рідини тим самим розсіюючи хвильову енергію та забезпечуючи стабільність конструкції резервуара [23].

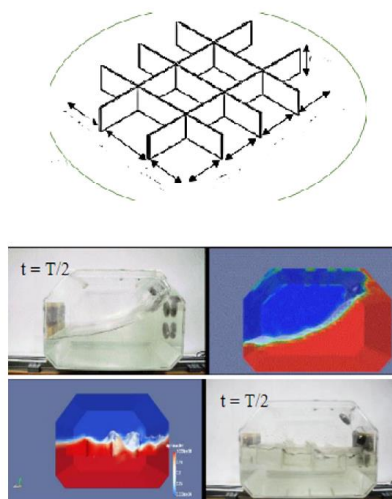


Рис. 1.10. Конструкція плаваючої комірчастої перегородки та положення рідини у резервуарі з перегородкою та без неї [21]

Таким чином, плаваючі перегородки є ефективним рішенням для зменшення навантажень, що підвищує безпеку та надійність транспортування рідин, особливо під час морських транспортувань.

1.2. Загальний огляд методів чисельного моделювання інерційних течій.

Чисельне моделювання інерційних течій є ключовим інструментом для аналізу динаміки рідин у складних системах, таких як резервуари з перегородками, авіаційні паливні баки, чи інші інженерні конструкції. Існує кілька основних підходів до моделювання інерційних течій, кожен з яких має свої переваги, обмеження та області застосування [24]. Нижче наведено огляд основних методів.

Тому, серед інженерної спільноти та профільних спеціалістів було створено та активно використовується велика кількість ефективних методів для дослідження коливань елементів сучасного обладнання. Найбільш розповсюдженими можна відмітити метод скінченних елементів (МСЕ), метод скінчених різниць, метод згладжених часток (SPH), метод граничних елементів (ВЕМ).

1.2.1. Метод кінцевих елементів (МКЕ)

Метод кінцевих елементів (МКЕ) [25] є одним із найефективніших інструментів для чисельного аналізу фізичних процесів, зокрема інерційних течій у резервуарах із гнучкими перегородками. Його принципи базуються на дискретизації області задачі: геометричну область розбивають на невеликі прості елементи, такі як трикутники, квадрати, тетраедри або шестигранники. У межах кожного елемента фізичні величини апроксимуються за допомогою функцій форми, які забезпечують зв'язок між вузлами, тобто точками, що з'єднують ці елементи [26-27]. Це дозволяє перетворити вихідні диференціальні рівняння, які описують динаміку рідини та поведінку конструкцій, у систему алгебраїчних рівнянь.

Для моделювання інерційних течій у резервуарах використовуються рівняння Нав'є-Стокса, які описують рух в'язкої нестисливої рідини:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{f}, \quad (1.1)$$

де ρ — густина рідини; $\mathbf{v}$ — швидкість потоку рідини; p — тиск; μ — коефіцієнт динамічної в'язкості; $\mathbf{f}$ — зовнішні сили, наприклад, гравітація.

Для врахування деформацій гнучких перегородок застосовуються рівняння механіки деформівного тіла, наприклад, рівняння Ламе для пружного матеріалу:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \mathbf{f} = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2}, \quad (1.2)$$

де $\boldsymbol{\sigma}$ — тензор напружень; $\mathbf{u}$ — переміщення матеріалу; ρ — густина матеріалу перегородки; $\mathbf{f}$ — зовнішні сили.

Суть МКЕ полягає у формулюванні слабкої форми цих рівнянь. Наприклад, для рівняння Нав'є-Стокса, після множення на тестову функцію ϕ і інтегрування по всій області Ω , отримуємо:

$$\int_{\Omega} \rho \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} \phi d\Omega + \int_{\Omega} \rho (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \phi d\Omega = \int_{\Omega} -\nabla p \phi d\Omega + \int_{\Omega} \mu \nabla^2 \mathbf{v} \phi d\Omega + \int_{\Omega} \mathbf{f} \phi d\Omega, \quad (1.3)$$

Це рівняння дискретизується за допомогою функцій форми N_i , які описують поведінку змінних у межах кожного кінцевого елемента:

$$\mathbf{v}(x, y, z, t) \approx \sum_{i=1}^n N_i(x, y, z) \mathbf{v}_i(t), \quad (1.4)$$

де $N_i(x, y, z)$ — функції форми, а $\mathbf{v}_i(t)$ — вузлові значення швидкості.

Розрахунок починається зі створення геометричної моделі резервуара. Ця модель розбивається на сітку кінцевих елементів. Для складних задач використовуються адаптивні сітки, які дозволяють підвищити точність у критичних зонах. Потім задаються фізичні властивості рідини (густина, в'язкість) і матеріалу перегородки (модуль Юнга, коефіцієнт демпфування), а також граничні та початкові умови, такі як умови непроникності на стінках резервуара та умови сполучення на межі "рідина–перегородка".

Глобальна система рівнянь для всього об'єкта має вигляд:

$$[\mathbf{K}]\{\mathbf{X}\} = \{\mathbf{F}\}, \quad (1.5)$$

де $[K]$ — матриця жорсткості, яка залежить від фізичних властивостей та геометрії системи; $\{X\}$ — вектор невідомих (швидкість, тиск, напруження); $\{F\}$ — вектор зовнішніх впливів.

Розв'язання цієї системи здійснюється чисельно за допомогою методів лінійної алгебри, таких як метод Гаусса або ітераційний метод спряжених градієнтів. Після цього результати аналізуються: отримуються поля швидкостей, тисків, напружень та деформацій у системі.

Метод кінцевих елементів забезпечує високу точність навіть для задач зі складною геометрією, дозволяючи враховувати нелінійності, такі як турбулентність, великі деформації конструкцій або складну взаємодію між рідиною і конструкцією. Одночасно метод є обчислювально інтенсивним і потребує великих ресурсів для моделювання. Найбільш поширені програмні пакети для реалізації МКЕ включають ANSYS Fluent, COMSOL Multiphysics, ABAQUS і OpenFOAM. Завдяки своїй універсальності та надійності МКЕ є одним із основних методів чисельного аналізу інерційних течій у сучасній науці й техніці.

1.2.2. Метод граничних елементів (BEM)

Метод граничних елементів (Boundary Element Method, BEM) [28] є одним із сучасних чисельних підходів до розв'язання фізичних задач, які формуються через рівняння в частинних похідних. Основною ідеєю цього методу є зведення розрахунків з об'єму до його межі, що значно скорочує обсяг обчислень для задач зі складною геометрією. BEM широко застосовується для аналізу задач механіки рідини, зокрема для моделювання інерційних течій у резервуарах, а також для задач взаємодії рідини та конструкцій [29-30].

Метод базується на принципах формулювання задач у інтегральній формі. Для рівнянь Лапласа або Гельмгольца, що описують стаціонарні чи динамічні процеси в рідинах, ВЕМ використовує граничну інтегральну форму:

$$c(x)u(x) + \int_{\Gamma} u(y) \frac{\partial G(x, y)}{\partial n_y} d\Gamma_y = \int_{\Gamma} \frac{\partial u(y)}{\partial n_y} G(x, y) d\Gamma_y, \quad (1.6)$$

де x — точка спостереження; $u(y)$ — шукане поле (наприклад, швидкість чи тиск); $G(x, y)$ — фундаментальний розв'язок відповідного рівняння; Γ — межа області; $\partial G / \partial n_y$ — нормальна похідна фундаментального розв'язку.

Однією з головних переваг ВЕМ є те, що замість дискретизації всього об'єму області (як у методі кінцевих елементів), дискретизації підлягає лише її межа Γ . Це дозволяє значно зменшити кількість обчислювальних елементів, особливо для задач з великою або нескінченною областю.

Процес реалізації методу граничних елементів починається з дискретизації границі області на сегменти (граничні елементи), у межах яких фізичні величини апроксимуються функціями форми. Наприклад, поле швидкості чи тиску подається у вигляді:

$$u(x) \approx \sum_{i=1}^N N_i(x) u_i, \quad (1.7)$$

Де $N_i(x)$ — функція форми, u_i — вузлові значення на межі.

Важливим етапом є формулювання граничних умов. Для інерційних течій у резервуарах це можуть бути:

- умови непроникності рідини через стінки резервуара ($v \cdot n = 0$);
- відповідність швидкості рідини переміщенням гнучкої перегородки ($v = \partial u / \partial t$);
- передачу напружень між рідиною і конструкцією.

Застосування фундаментального розв'язку дозволяє перетворити рівняння в частинних похідних у систему лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$[H]\{u\} + [G]\{q\} = \{b\}, \quad (1.8)$$

де $[H]$ і $[G]$ — матриці коефіцієнтів, які залежать від геометрії та граничних умов; $\{u\}$ — вузлові значення поля (наприклад, швидкості); $\{q\}$ — вузлові значення нормальних похідних (наприклад, градієнтів тиску); $\{b\}$ — відомі граничні умови.

Однією з особливостей ВЕМ є можливість природного врахування нескінченних областей, що важливо для задач гідродинаміки, наприклад, у відкритих резервуарах або при моделюванні хвиль. Завдяки цьому немає необхідності штучно обмежувати область дослідження.

Основними перевагами ВЕМ є зменшення обчислювальних витрат через скорочення кількості елементів, а також висока точність для задач зі складною геометрією або умовами на нескінченності. Однак цей метод має і недоліки, зокрема складність врахування нелінійних ефектів (наприклад, турбулентності) та труднощі з побудовою фундаментальних розв'язків для деяких рівнянь.

Програмні пакети, що реалізують ВЕМ, включають BEASY, OpenBEM, а також модулі в більш універсальних програмах, таких як ANSYS чи COMSOL Multiphysics. У задачах взаємодії рідини з гнучкими перегородками метод граничних елементів дозволяє ефективно моделювати процеси, де важливо враховувати точні умови на межах та взаємодію між рідиною і конструкцією.

1.2.3. Метод згладжених часток (SPH)

Метод згладжених часток (Smoothed Particle Hydrodynamics, SPH) [31] є одним із ефективних чисельних підходів для моделювання динаміки рідин і газів, зокрема інерційних течій у резервуарах. Цей метод базується на лагранжевому підході, у якому середовище розглядається як набір дискретних часток, що рухаються у просторі. SPH широко використовується для

моделювання вільної поверхні рідин, хвиль, турбулентності, а також взаємодії рідини з гнучкими конструкціями [32].

Основна ідея методу полягає у представленні фізичних величин (швидкість, тиск, густина) у вигляді згладженої суми внесків від сусідніх часток. Згладжування виконується за допомогою спеціальних функцій — згладжувальних ядер $W(r, h)$, де r — відстань між частками, а h — параметр згладжування (радіус впливу ядра). Наприклад, густина рідини у певній точці визначається як:

$$\rho(r) = \sum_j m_j W(|r - r_j|, h), \quad (1.9)$$

де m_j — маса частки j , а r_j — її координати.

Рівняння Нав'є-Стокса, які описують динаміку рідини, записуються у вигляді, що враховує дискретний характер середовища:

$$\frac{dv_i}{dt} = - \sum_j m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} \right) \nabla W(|r_i - r_j|, h) + f_i, \quad (1.10)$$

де v_i — швидкість частки i , p_i — тиск, ρ_i — густина, f_i — густина.

Для врахування гнучких перегородок використовується зв'язок між рідиною та конструкцією. Перегородка моделюється як набір часток, що взаємодіють із рідиною через передачу сил. Наприклад, тиск рідини на частки перегородки визначається як:

$$F_{\text{пер}} = \sum_j m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} \nabla W \right), \quad (1.11)$$

де підсумовування проводиться для часток рідини, які перебувають у межах радіуса впливу.

Метод SPH дозволяє природно моделювати вільну поверхню рідини, обтікання складних конструкцій, а також великі деформації гнучких матеріалів.

Завдяки лагранжевому підходу SPH не потребує побудови обчислювальної сітки, що спрощує реалізацію задач зі складною геометрією або рухомими межами.

Процес реалізації SPH складається з таких етапів:

1. Ініціалізація часток: середовище розбивається на дискретні частки, кожній із яких задаються маса, положення та початкова швидкість.
2. Обчислення згладжених величин: На кожному кроці інтегрування визначаються густина, тиск і швидкість часток за допомогою згладжувального ядра.
3. Інтегрування рівнянь руху: Для кожної частки розраховуються сили, що діють на неї, після чого обчислюються нові положення та швидкості.
4. Взаємодія з конструкцією: Визначаються сили, що передаються між частками рідини та частками конструкції (наприклад, перегородки).

SPH має численні переваги, зокрема гнучкість у моделюванні складних фізичних явищ, таких як руйнування, хвилі або турбулентність. Водночас метод є обчислювально інтенсивним, оскільки потребує врахування взаємодії кожної частки з багатьма іншими.

Сучасні програмні реалізації SPH включають такі пакети, як DualSPHysics, LAMMPS, LS-DYNA та інші. SPH є незамінним інструментом для моделювання задач, де традиційні підходи (наприклад, метод кінцевих елементів) стають занадто складними або обчислювально затратними.

1.2.4. Метод кінцевих різниць (МКР)

Метод кінцевих різниць (МКР) [33-34] є одним із найстаріших і широко використовуваних чисельних методів для розв'язання диференціальних рівнянь у частинних похідних. Він базується на апроксимації похідних за допомогою кінцевих різниць, що дозволяє замінити складні рівняння системою алгебраїчних рівнянь. МКР часто застосовується для моделювання інерційних течій рідини,

теплопереносу, хвильових процесів та інших явищ у задачах фізики й механіки [36-37].

Основна ідея МКР полягає у дискретизації області задачі на рівномірну сітку. Точки сітки називаються вузлами, у яких обчислюються шукані величини, такі як швидкість, тиск чи густина рідини. Наприклад, для апроксимації першої похідної функції $u(x)$ за просторовою координатою x використовуються такі формули:

1. Прямий різницевий оператор:

$$\frac{\partial u}{\partial x} \approx \frac{u(x + \Delta x) - u(x)}{\Delta x}, \quad (1.12)$$

2. Зворотний різницевий оператор:

$$\frac{\partial u}{\partial x} \approx \frac{u(x) - u(x - \Delta x)}{\Delta x}, \quad (1.13)$$

3. Центральний різницевий оператор:

$$\frac{\partial u}{\partial x} \approx \frac{u(x + \Delta x) - u(x - \Delta x)}{2\Delta x}, \quad (1.14)$$

Центральна різниця є найпоширенішою, оскільки забезпечує вищу точність за рівного кроку Δx .

Для моделювання інерційних течій рідини використовуються рівняння Нав'є-Стокса, які в дискретизованій формі за допомогою МКР набувають вигляду системи алгебраїчних рівнянь. Наприклад, у двовимірному випадку рівняння для компоненти швидкості u у напрямку x записується як:

$$\begin{aligned} & \frac{u_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^n}{\Delta t} + u_{i,j}^n \frac{u_{i+1,j}^n - u_{i-1,j}^n}{2\Delta x} + v_{i,j}^n \frac{u_{i,j+1}^n - u_{i,j-1}^n}{2\Delta y} \\ &= -\frac{1}{\rho} \frac{p_{i+1,j}^n - p_{i-1,j}^n}{2\Delta x} + v \left(\frac{u_{i+1,j}^n - 2u_{i,j}^n + u_{i-1,j}^n}{\Delta x^2} + \frac{u_{i,j+1}^n - 2u_{i,j}^n + u_{i,j-1}^n}{\Delta y^2} \right), \end{aligned} \quad (1.15)$$

де $u_{i,j}^n$ — швидкість у вузлі сітки (i,j) на часовому кроці n; Δx , Δy — просторові кроки сітки; Δt — крок часу; v — кінематична в'язкість; p — тиск.

Для взаємодії рідини з гнучкими перегородками задаються спеціальні граничні умови. Наприклад, на межі рідина–перегородка швидкість рідини дорівнює швидкості поверхні перегородки:

$$v_{\text{рідини}} = \frac{\partial u_{\text{перегородки}}}{\partial t}, \quad (1.16)$$

Метод кінцевих різниць використовується у поєднанні з явними чи неявними схемами інтегрування в часі. Явні схеми (наприклад, метод Ейлера) є простішими для реалізації, але вимагають малих часових кроків для забезпечення стабільності. Неявні схеми (наприклад, метод Кранка-Ніколсона) є стабільними для більших часових кроків, але потребують розв'язання нелінійних рівнянь.

Метод кінцевих різниць характеризується простотою реалізації, зрозумілістю алгоритмів і високою точністю на регулярних сітках, особливо в прямокутних областях. Проте його застосування ускладнюється для задач зі складною геометрією чи нерегулярними межами. Крім того, метод потребує розв'язання великих систем рівнянь, що може бути обчислювально затратним, і чутливий до вибору просторових і часових кроків, що впливає на стабільність та точність розрахунків.

Сучасні програмні пакети, які реалізують МКР, включають CFD-софт, такі як OpenFOAM, MATLAB, Fluent, та інші. Завдяки універсальності й простоті цей метод широко застосовується для чисельного моделювання інерційних течій у резервуарах із гнучкими перегородками та в інших задачах гідродинаміки.

Висновок

В даному розділі було проведено огляд сучасних методів і рішень для демпфірування інерційних течій рідини в резервуарах. Визначено ключові проблеми, пов'язані з динамічною стійкістю резервуарів, впливом інерційних течій на конструкцію та безпеку експлуатації. Основну увагу приділено

порівняльному аналізу традиційних жорстких перегородок та сучасних гнучких конструкцій.

Результати аналізу показують, що жорсткі перегородки забезпечують високу стабільність конструкції за статичних умов, але їх ефективність знижується у динамічних режимах через низьку адаптивність до змінних навантажень та значне збільшення ваги системи. Гнучкі перегородки, у свою чергу, демонструють перспективність для використання у мобільних і динамічних системах завдяки здатності адаптуватися до руху рідини, зменшеній вазі та більшій ефективності у складних умовах.

Також розглянуто чисельні підходи до моделювання інерційних течій у резервуарах. Метод кінцевих елементів, метод граничних елементів, метод згладжених часток і метод кінцевих різниць забезпечують можливість глибокого аналізу динамічних процесів у резервуарах і вибору оптимальних конструктивних рішень. Їх використання дозволяє врахувати складні фізичні процеси, такі як турбулентність, нелінійні ефекти та взаємодію рідини з конструкцією.

Зроблені висновки підтверджують необхідність подальших досліджень у напрямку оптимізації параметрів гнучких перегородок, зокрема вибору матеріалів, жорсткості та геометричних характеристик, для досягнення максимальної ефективності демпфірування.

РОЗДІЛ 2. ОГЛЯД АКТУАЛЬНОЇ ЛІТЕРАТУРИ. ПОЧАТКОВА ПАРАМЕТРИЗАЦІЯ ДОСЛІДЖУВАЛЬНОГО ОБ'ЄКТУ

У цьому розділі представлено результати теоретичних та експериментальних досліджень, спрямованих на вивчення процесів демпфірування інерційних течій за допомогою гнучких перегородок. Проведено загальний огляд актуальної літератури та наукових досліджень, присвячених порівняльному аналізу параметрів жорстких та гнучких перегородок, встановлених всередині резервуара.

Також, в даному розділі було проведено підготовку до виконання наступного етапу дослідження – створення математичної моделі, симуляції інерційних потоків рідини у резервуарі та аналіз ефективності гнучких перегородок в порівнянні з жорсткими.

2.1. Порівняльний аналіз жорстких і гнучких перегородок

Жорсткі та гнучкі перегородки є основними методами для демпфірування інерційних течій рідини в резервуарах, проте їх механізми дії і вплив на інерційні процеси істотно різняться. Основні характеристики, що відрізняють ці два типи перегородок, включають їх конструкцію, здатність адаптуватися до динамічних навантажень, ефективність демпфірування, а також вагу та об'єм, який вони займають в резервуарі.

Розглядаючи дослідження по даній темі, представлені в роботах Ченьсі Чжао, Янь Ву, Юнчуань Юй та Оскара Й. Гайдна, можна виконати попередні розрахунки та порівняльний аналіз резервуарів з жорсткими та гнучкими перегородками. Вони в своїй роботі [37] розглянули силу, яка діє під час процесу розбризкування рідини, і вплив перегородок на придушення даного ефекту. Щільність, коефіцієнт Пуассона і модуль Юнга резервуара становлять 7890 кг/м^3 , $0,27$ і 135 ГПа відповідно, а сам аналіз починається з поведінки плескання, тобто процес попереднього навантаження за допомогою методу демпфування ігнорується

На Рис. 2.1. зображено конструкції стандартного резервуара СПГ, а також резервуара, оснащеного двома видами перегородок: кільцевими перегородками та вертикальними перегородками. На Рис. 2.2. представлено порівняння безрозмірної висоти вільної поверхні води між трьома конфігураціями резервуарів.

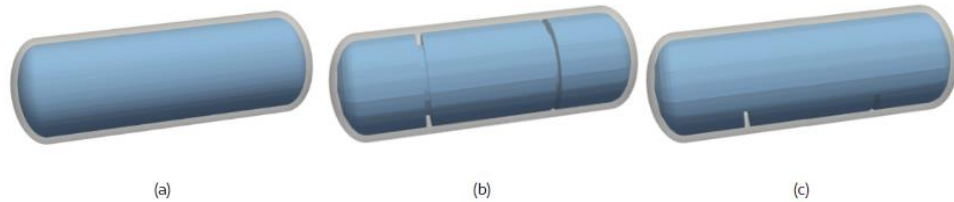


Рис. 2.1. Конструкції пружних резервуарів: (а) без перегородки, (б) з 2 кільцевими перегородками і (в) з 2 вертикальними перегородками. [37]

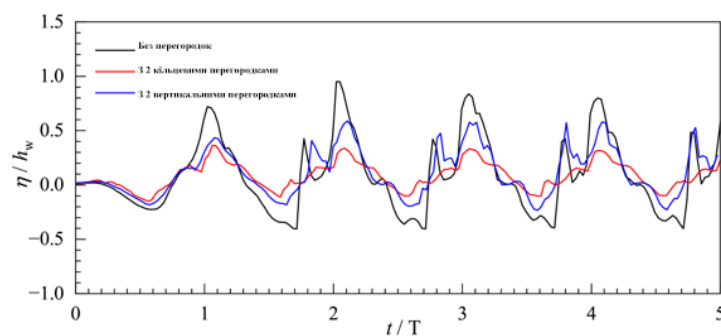


Рис. 2.2. Порівняння безрозмірної висоти вільної поверхні води в звичайному резервуарі та резервуарі з перегородками

Відповідні режими рідини в третьому періоді, коли плескіт стає стійким, зображені на Рис. 2.3. та Рис. 2.4.

Тут вибрано чотири репрезентативні моменти, включно з рідиною, яка готується перекинутися в праву сторону, рідиною, що вдаряється в праву головку резервуара, і зворотним потоком після удару.

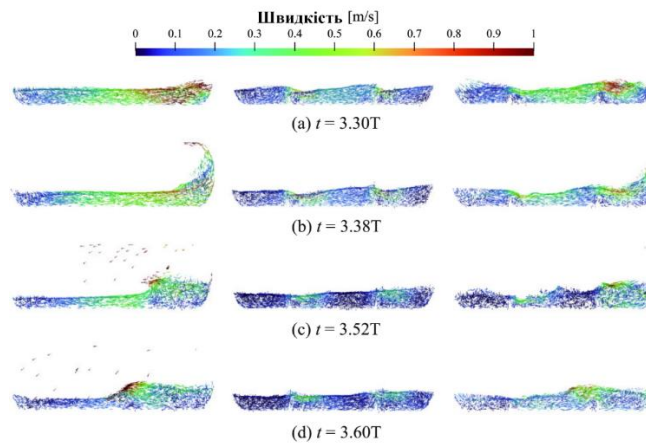


Рис. 2.3. Розподіл швидкостей води в третьому періоді. ліворуч: резервуар без перегородки, посередині: резервуар із 2 кільцевими перегородками, праворуч: резервуар із 2 вертикальними перегородками. [37]

Примітно, що введення перегородок сприяє ефективному пом'якшенню плескання, перешкоджаючи поширенню хвилі. Іншими словами, резервуари з двома кільцевими або вертикальними перегородками змінюють структуру потоку води і, отже, впливають на висоту вільної поверхні. Відносно кажучи, кільцеві перегородки мають більш виражений вплив на пом'якшення великих коливань у цьому чисельному випадку.

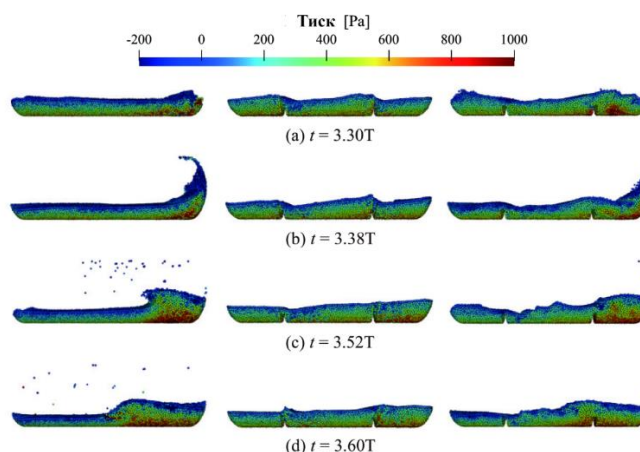


Рис. 2.4. Розподіл тиску води в третьому періоді. ліворуч: резервуар без перегородки, посередині: резервуар із 2 кільцевими перегородками, праворуч: резервуар із 2 вертикальними перегородками. [37]

Швидкість первинної хвилі займає максимальне значення, а інтеграція перегородок дає помітне уточнення розподілу швидкості, що призводить до більш гладкого поля тиску та більш контрольованої схеми потоку. Це покращення має

важливе значення для мінімізації турбулентності та нестабільного руху, які інакше могли б вплинути на стабільність та структурну цілісність баків. На Рис. 2.5. показано розподіл завихреності під час серії ударів після того, як вода вдарилася в ліву головку резервуарів.

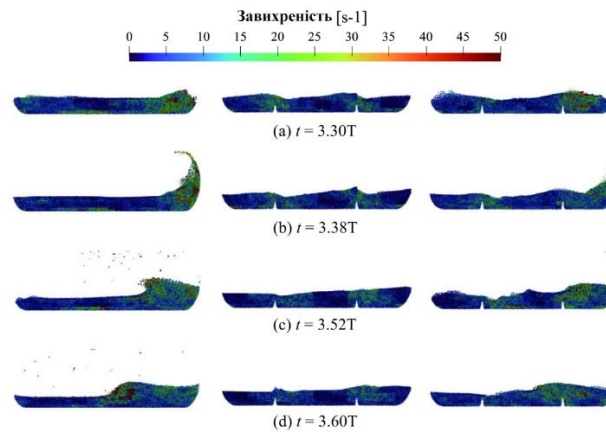


Рис. 2.5. Розподіл завихреності трьох типових моделей течії. ліворуч: резервуар без перегородки, посередині; резервуар із 2 кільцевими перегородками, праворуч; резервуар із 2 вертикальними перегородками. [37]

Коли хвиля стикається, розбивається та котиться в резервуарі без перегородки, завихреність у відповідних областях рідини швидко зростає, створюючи очевидні локальні максимуми. Однак із впровадженням перегородок відмінність цих типових явищ зменшується разом із зменшенням рівнів завихреності. Встановлення перегородок у резервуарах, здається, пом'якшує вираженість цих явищ, ефективно пригнічуючи швидке збільшення завихреності, що спостерігається за відсутності перегородок.

Сила в'язкості та загальна сила, що діє на стінки бака, зображені на Рис. 2.6 та Рис. 2.7. Поступово генеруються більш інтенсивні хвилі, і сили, що діють на тверді стінки, періодично діють після початкового періоду. Рідина в резервуарі без перегородки хлюпає сильніше, викликаючи більшу горизонтальну швидкість і силу в'язкості.

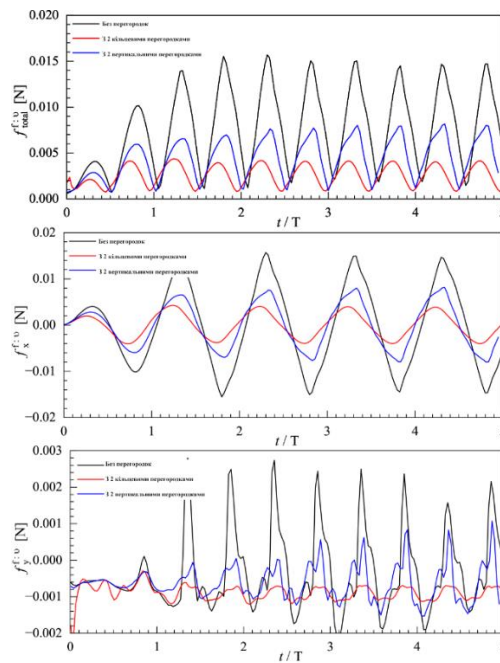


Рис. 2.6. Порівняння сили в'язкості на резервуарі між звичайним резервуаром, резервуаром, оснащеним 2 кільцевими перегородками, і резервуаром, обладнаним 2 вертикальними перегородками. [37]

В'язка сила є змінною, яка інтуїтивно показує стан потоку. В'язка складова в напрямку x становить більшість, оскільки горизонтальне розплескування в основному призводить до швидкості рідини в напрямку x . Рідина в резервуарі без перегородки хлюпає сильніше, викликаючи більшу горизонтальну швидкість і силу в'язкості. Мала в'язка сила спочатку вказує на те, що існує незначне в'язке тертя, спричинене потоком у напрямку y , що свідчить про відсутність утворення завихрення на початку. Після простого коливання поява розбиваючих хвиль і вихрового руху призводить до значного збільшення в'язкої сили. Як показано на Рис. 2.7., загальна сила в напрямку y відіграє головну роль через силу тяжіння. Виявляється чітка тенденція, коли перегородки сприяють зниженню загального навантаження на баки.

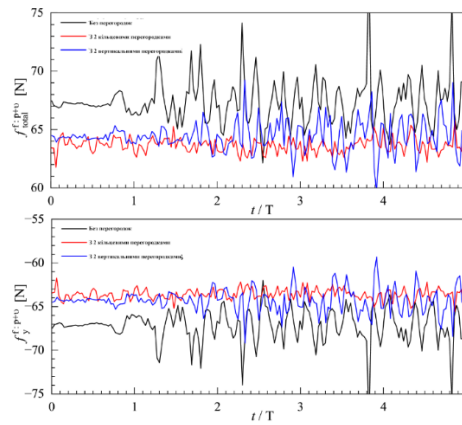


Рис. 2.7. Порівняння загальної сили на бак серед звичайного резервуара; резервуара оснащеного 2 кільцевими перегородками, і резервуара оснащеного 2 вертикальними перегородками. [37]

На Рис. 2.8. та Рис. 2.9. показано розподіли відповідних розподілів напруги та деформації резервуарів у третьому періоді (стабільна стадія плескання). Центральні області як передньої, так і задньої стінок разом із дном стандартного резервуара для СПГ зазнають найвищого рівня напруги та деформації. У міру того, як рідина рухається вправо і потрапляє на головку, в нижньому правому куті резервуара з'являється зона концентрації напруги. Ці конкретні зони несуть основний тягар сил від рідини в робочих умовах. Однак встановлення перегородок у конструкцію резервуару вносить кардинальний зсув у те, як розподіляються ці напруги.

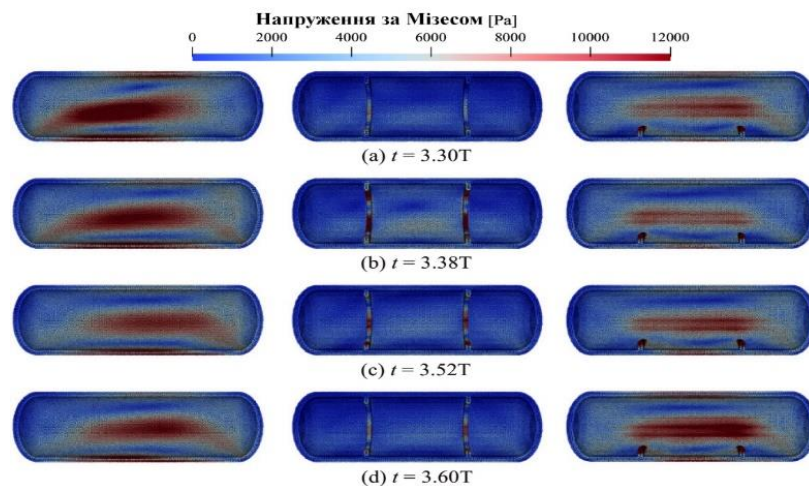


Рис. 2.8. Розподіл напруг резервуара в третьому періоді. ліворуч: резервуар без перегородки, посередині: резервуар із 2 кільцевими перегородками, праворуч: резервуар із 2 вертикальними перегородками. [37]

Ці внутрішні перегородки змінюють схему потоку рідини та відіграють вирішальну роль у зменшенні прямого навантаження на головні корпуси резервуарів, ефективно відхиляючи область концентрації напруги на себе. Помітне зниження рівнів напруги та деформації всередині основних корпусів демонструє ефективність системи перегородок у забезпеченні більш рівномірного розподілу сил у внутрішніх частинах бака.

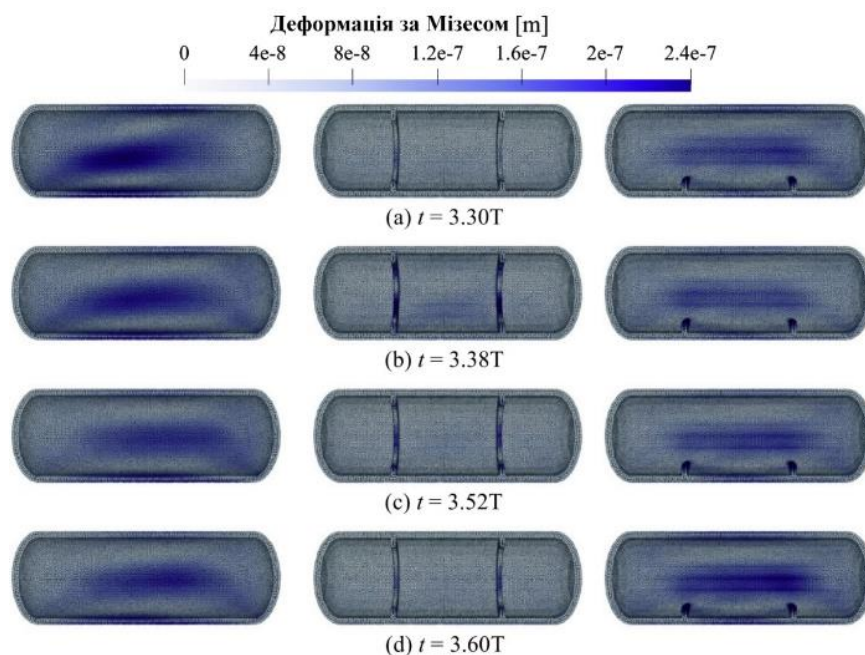


Рис. 2.9. Розподіл деформацій бака в третьому періоді. ліворуч: резервуар без перегородки, посередині: резервуар із 2 кільцевими перегородками, праворуч: резервуар із 2 вертикальними перегородками. [37]

Отже, резервуари краще обладнані, щоб витримувати вплив рідини без надмірного зносу основної конструкції.

Для полегшення більш детального аналізу сил танка стандартний танк $t = 3,38T$ береться як приклад для деконструювання матриці тензора напруги на її компоненти: три нормальні напруги та три напруги зсуву (Рис. 2.10.). У цей момент рідина вдаряється в праву головку резервуара, створюючи зону високого тиску в нижньому правому куті. Одночасно концентрація напруги на стінках резервуара мігрує вправо під впливом руху рідини.

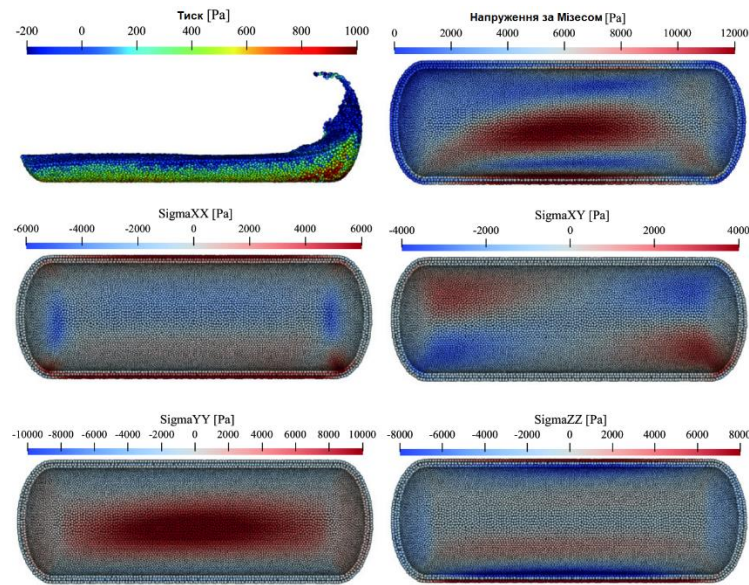


Рис. 2.10. Розподіл напруг пружного бака без перегородки при $t = 3,38$ Т.

[37]

Накладення обмежень на переміщення в центрі мас резервуара та вплив сил тяжіння породжують виражені напруги розтягування вздовж вертикального (вісь у) напрямку та горизонтального (вісь х) напрямку, а також перетину (z- вісь) відчують значні напруги розтягування на верхній і нижній зовнішніх поверхнях бака. Крім того, структурні міркування диктують, що нормальні напруги у верхній і нижній внутрішніх стінках у напрямку осі z виявляють помітну напругу стиску. Крім того, компонент швидкості розплескування рідини створює градієнт напруги зсуву в площині ху, що призводить до структурного кручення.

Порівняти ефект пом'якшення жорстких і пружних перегородок на плескання рідини, глибину $h_w/D=0,5$ і товстіша стіна $0,03$ м використовуються для моделювання в цьому розділі, а вертикальна перегородка вставлена в середнє положення. У резервуар встановлюється жорстка перегородка або пружна перегородка. Периферійна частина пружної перегородки прикріплена до стінки резервуара, а модуль Юнга пружної перегородки становить 500 кПа, 50 кПа або 5 кПа відповідно. Фізичні властивості матеріалу резервуара залишаються такими ж, як і в попередньому розділі, а щільність і пуассонівська пружна перегородка становить 2500 кг/м³ і $0,47$.

На Рис. 2.11. показано зміну висоти вільної поверхні протягом перших п'яти періодів, підкреслюючи критичну роль перегородок у придушенні великих коливань.

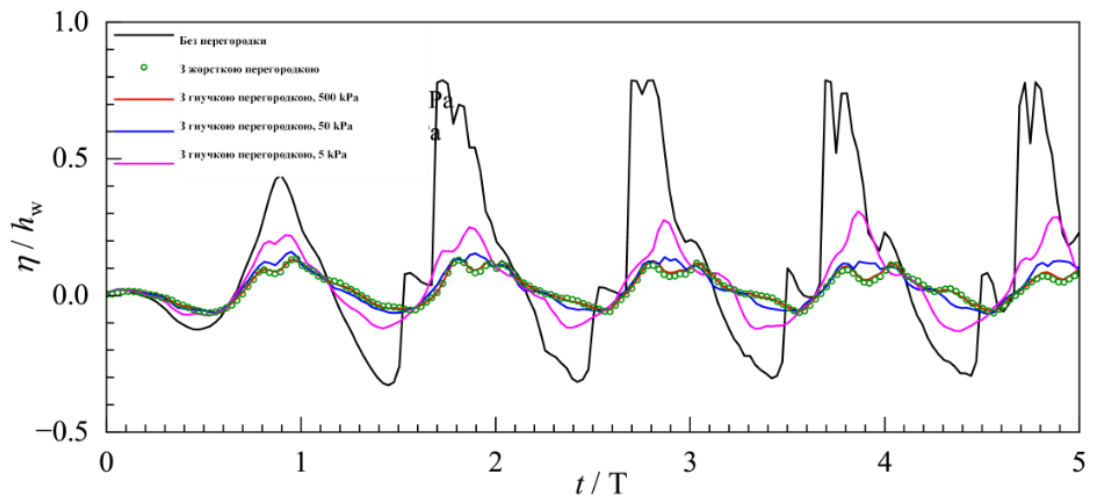


Рис. 2.11. Порівняння безрозмірного підйому вільної поверхні води в звичайному резервуарі та резервуарі з жорсткою або пружною перегородкою. [37]

Однак, коли модуль Юнга пружної перегородки низький, її ефективність обмежена. Іншими словами, чим ближче властивості перегородки до властивостей твердого тіла, тим сильніший гальмівний вплив на плескання рідини. Оскільки модуль Юнга досягає 500 кПа, існує незначна різниця в продуктивності між пружними та жорсткими перегородками.

Відповідні схеми потоку води, включаючи розподіли швидкості та тиску в різних конфігураціях при $2,25T$ і $2,5T$, показані на Рис. 2.12. і Рис. 2.13., що представляє рідину, що вдарається в праву голову, і зворотний потік. Швидкість вільної поверхні досить висока в резервуарі без перегородки, тоді як перегородки суттєво зменшують величину швидкості та мають певний вплив на покращення області високого тиску рідини поблизу кута резервуара.

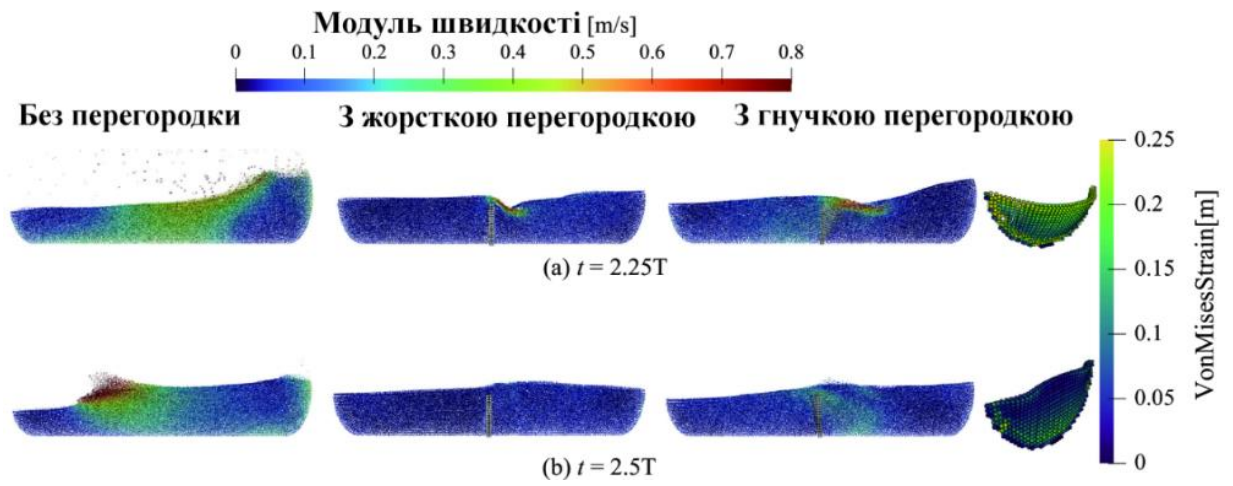


Рис. 2.12. Рідинні режими води у звичайному резервуарі та резервуарі з жорсткою або пружною перегородкою (модуль Юнга 5 кПа) при $t = 2,25T$ і $t = 2,5T$. Права частина - розподіл деформації пружної перегородки. [37]

Крім того, можна побачити, що пружна перегородка з модулем Юнга, рівним 5 кПа, деформується під впливом води, послаблюючи її ефективність у регулюванні потоку.

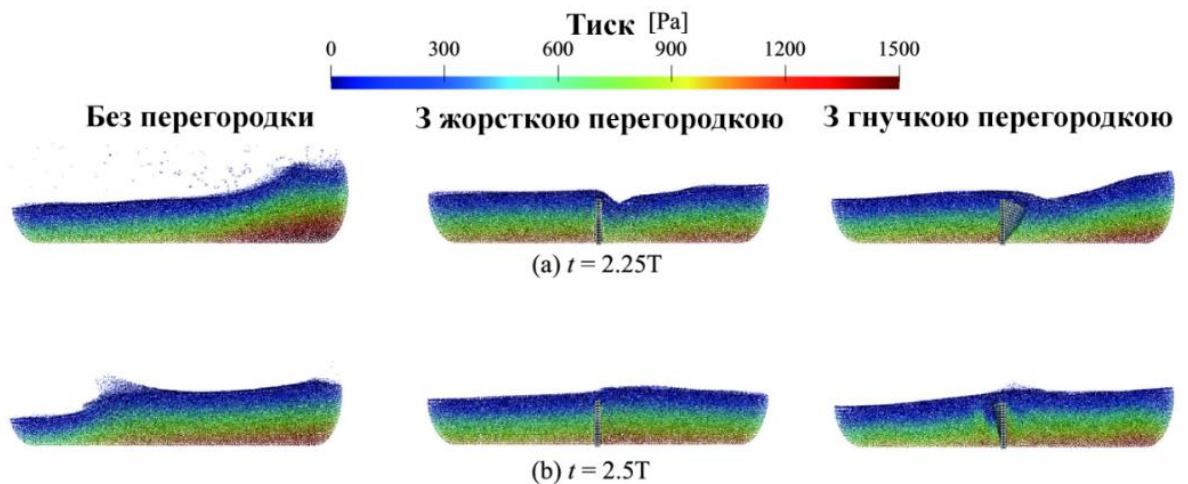


Рис. 2.13. Розподіл тиску води в звичайному резервуарі і резервуарі з жорсткою або пружною перегородкою $t = 2,25T$ і $t = 2,5T$. [37]

Рис. 2.14. і Рис. 2.15. , які зображують силу в'язкості та загальну силу рідини на резервуарах, чітко ілюструють, що перегородки мають чудовий вплив на зменшення сили в'язкості та загальної сили на резервуари.

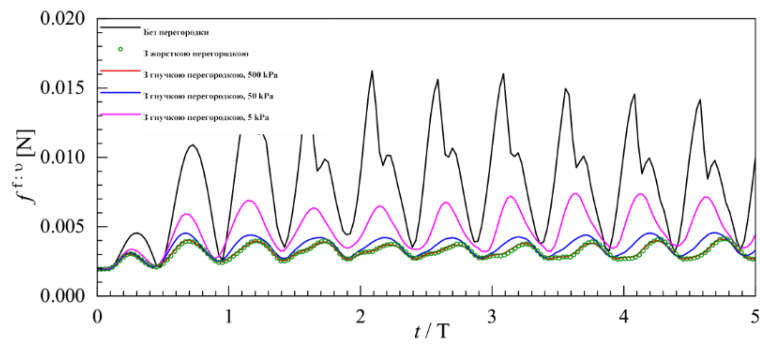


Рис. 2.14. Сила в'язкості на стінках резервуара у звичайному резервуарі та резервуарі з жорсткою або пружною перегородкою. [37]

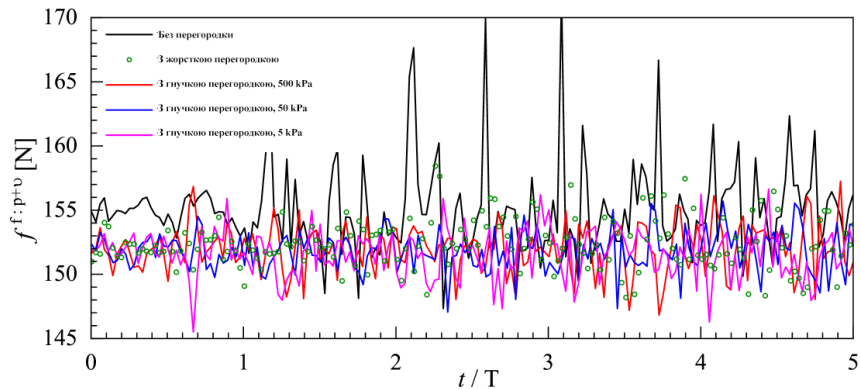


Рис. 2.15. Загальна сила, що діє на стінки резервуара у звичайному резервуарі та резервуарі з жорсткою або пружною перегородкою [37]

Крім того, розподіл напружень і деформацій стінок резервуару при $t = 2,25T$ і $t = 2,5T$ відображені на Рис. 2.16. і Рис. 2.17.

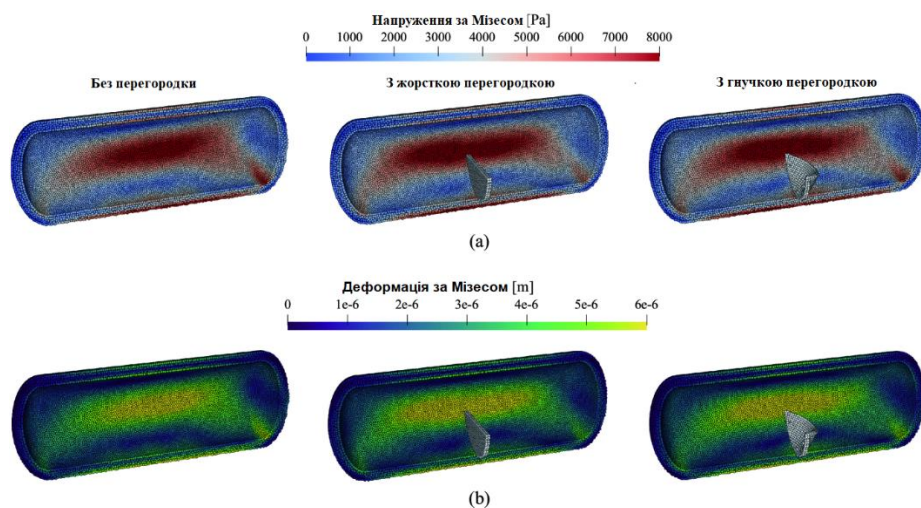


Рис. 2.16. Розподіл напружень і деформацій резервуарів при $t = 2,25T$. [37]

Застосування перегородок призводить до певного зменшення максимальної сили та діапазону деформації, яку зазнають баки.

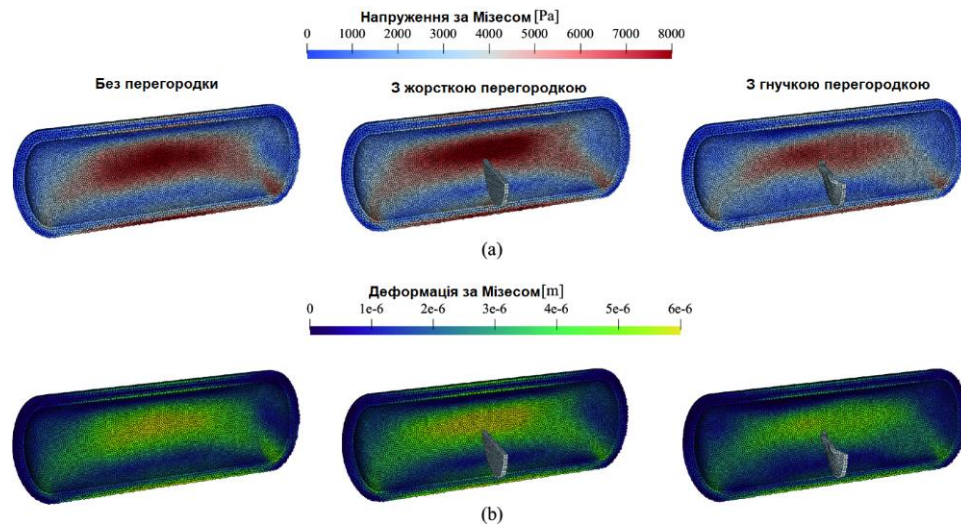


Рис. 2.17. Розподіл напружень і деформацій резервуарів при $t = 2,25T$. [37]

У випадках, налаштованих із різними перегородками, в'язка сила та загальна сила рідини на перегородках відображені на Рис. 2.18 та Рис. 2.19.

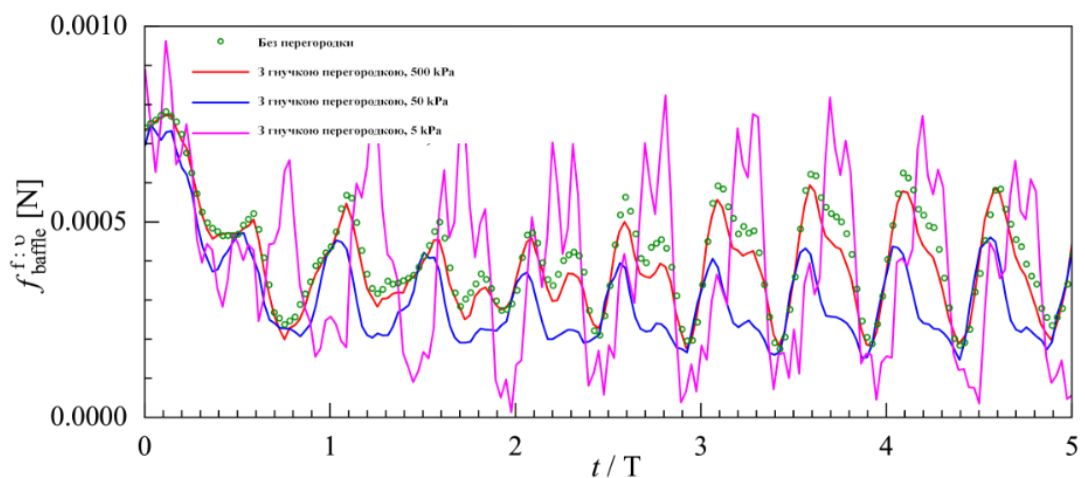


Рис. 2.18. Сила в'язкості на перегородку в резервуарі з жорсткою або пружною перегородкою. [37]

Перегородка з меншим модулем Юнга демонструє більш виражену зміну сили протягом плескаючого руху.

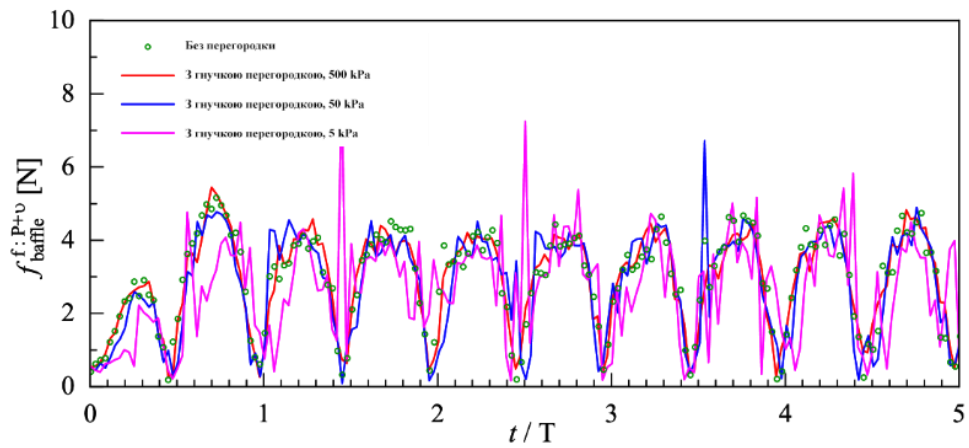


Рис. 2.19. Загальна сила на перегородку в резервуарі з жорсткою або пружною перегородкою. [37]

Чисельні результати даного дослідження показують, що властивості перегородки, схожі на властивості твердого тіла, більш ефективні для придушення розплескування рідини, що призводить до більш помітного покращення сил, що діють на стінки бака. Це пояснюється тим, що пружна перегородка з високим модулем Юнга слабше контролює потік рідини.

Також, можна привести результати дослідження НАСА за 1967 рік [38]. Згідно з проведених експериментів, було отримано, що легкі гнучкі кільцеві перегородки ефективні для демпфірування коливань рідини у відносно великих циліндричних резервуарах. Результати підтвердили висновки модельних досліджень і продемонстрували, що демпфірування, порівнянне з тим, яке забезпечує жорстка перегородка, можна отримати за допомогою менш масивних, гнучких перегородок (Рис. 2.20.). На основі охоплених у випробуваннях змінних, були зроблені наступні висновки:

- Гнучка перегородка забезпечує демпфірування величини, порівнянної з демпфіруванням жорсткої перегородки, або навіть перевищує її за подібного коливального потоку.
- Ефективність або демпфірування на одиницю ваги, пов'язане з гнучкою перегородкою, може значно перевищувати показники жорсткої перегородки.

- Величина демпфірування, забезпечена гнучкою перегородкою, залежить від двох безрозмірних параметрів, які можуть бути масштабовані: періодного параметра, пропорційного відношенню амплітуди рідини до ширини перегородки, і параметра гнучкості, пропорційного відношенню прогину перегородки до її ширини.
- Значення демпфірування для жорсткої перегородки приблизно на 20 відсотків нижчі, ніж ті, що передбачені рівнянням Майлза, яке повинно бути достатньо точним для більшості застосувань.
- Зменшення частоти коливань через наявність гнучкої перегородки менше, ніж зміщення, властиве жорсткій перегородці.

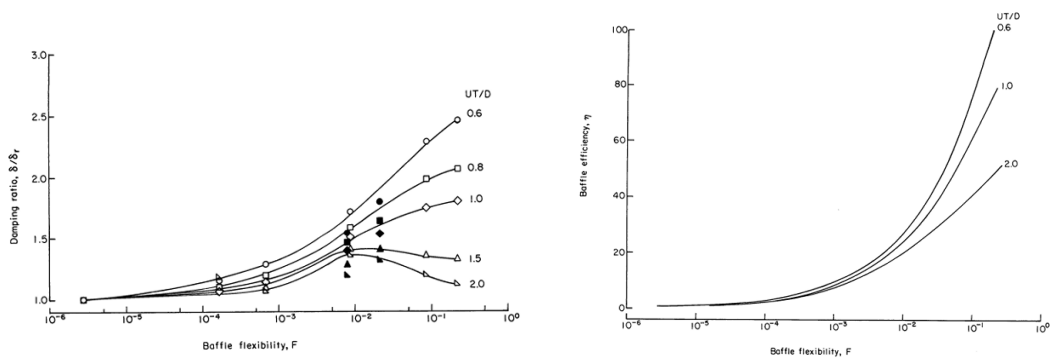


Рис. 2.20. Результати проведених НАСА експериментів.[38]

Тому, можна сказати, що жорсткі перегородки впливають на інерційні течії рідини, обмежуючи об'єм її руху, що призводить до фізичного поділу рідини та стримування хвильових коливань. Це ефективно в умовах стабільного навантаження, проте в динамічних умовах їх ефективність може знижуватись. На противагу, гнучкі перегородки забезпечують більш адаптивний вплив на інерційні течії, зменшуючи їх амплітуду за рахунок поглинання енергії коливань через власну деформацію. Це робить їх ефективнішими в умовах змінних і складних навантажень, коли необхідна швидка адаптація до руху рідини.

У цілому, вибір між жорсткими і гнучкими перегородками залежить від конкретних вимог до демпфірування, умов експлуатації та обмежень у конструкції резервуара. Жорсткі перегородки підходять для статичних умов і важких конструкцій, де стабільність є пріоритетом, тоді як гнучкі перегородки

краще підходять для динамічних середовищ, де потрібна висока адаптивність і зменшення ваги конструкції.

2.2. Загальні відомості та характеристики досліджуваного резервуара

Так як більшість динамічних явищ та переміщень рідини відбуваються відбувається в мобільних резервуарах [39-41], то для дослідження процесів, що відбуваються всередині резервуару, було обрано за модель для подальшого дослідження автоцистерну еліптичної форми, що є одними з найпопулярніших видів резервуарів для перевезення світлих нафтопродуктів.

На Рис. 2.21. показано поведінку рідини в резервуарі під час різкого гальмування. Інерційний імпульс, створений цим рухом, підвищує неконтрольованість дій водія, що у свою чергу, збільшує ризики аварій та катастроф під час транспортування рідини.

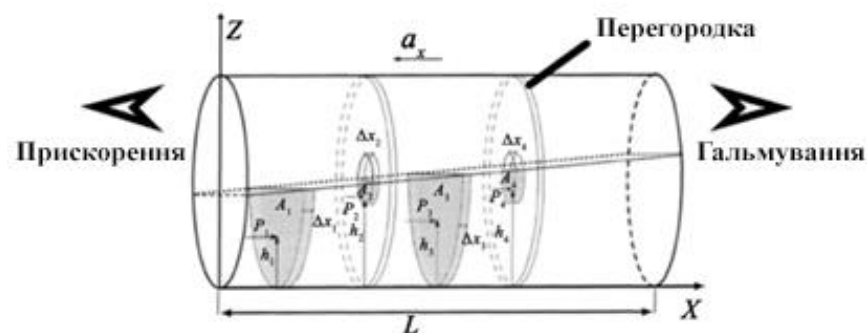


Рис. 2.21. Явище коливань рідини в резервуарі під час прискорення та уповільнення [36]

На основі продукції компанії Dongfeng (Рис. 2.22.) було розроблено об'ємну 3D-модель автоцистерни, що в подальшому стане основою для проведення моделювання та досліджень інерційних течій в середині резервуара. У якості експериментальних варіантів буде розглянуто резервуар без перегородок, з жорсткими перегородками та з гнучкими перегородками.



Рис. 2.22. Фотографія автоцистерни Dongfeng

Подальші моделі резервуара були розроблені в CAD-середовищі SolidWorks (Рис. 2.23.), що дозволяє створити детальні моделі досліджуваного об'єкту для подальшої симуляції в програмі модулі SolidWorks – Flow Simulation.

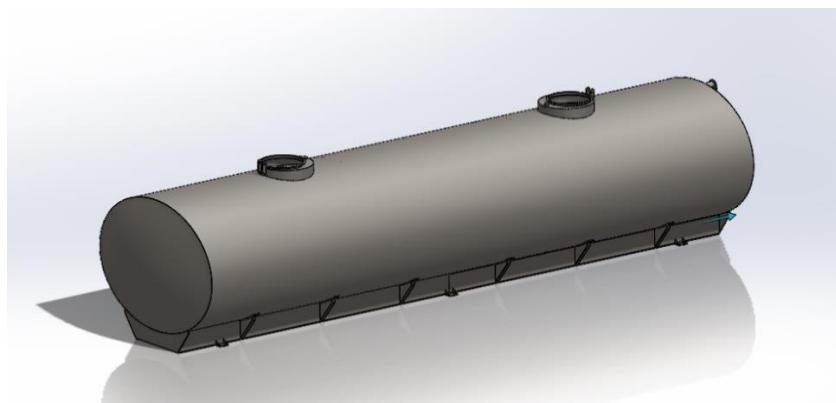


Рис. 2.23. 3D модель досліджувального резервуара, розробленого в CAD-середовищі SolidWorks

В Таблиці 2.1. вказані технічні характеристики автоцистерни:

Табл.2.1. Характеристики автоцистерни

Параметр	Опис
Форма резервуара	Еліптична
Габарити резервуара	Ширина: 2300 мм, Висота: 1700 мм, Довжина: 9000 мм
Об'єм резервуара	27,64 м ³ (приблизно 27 640 літрів)
Матеріал резервуара	- Алюмінієвий сплав (полегшена конструкція) - Нержавіюча сталь (для агресивних середовищ)

	- Вуглецева сталь (універсальне застосування)
Товщина стінок	- Стандарт: 6–8 мм для алюмінію - 4–6 мм для нержавіючої сталі
Кількість відсіків	1 або 2 (опціонально)
Захист	- Антикоровізне покриття - Теплоізоляція (опціонально)
Система безпеки	- Донні клапани для запобігання витоків - Система уловлювання парів - Протишовкові перегородки всередині резервуара
Насосне обладнання	- Самовсмоктувальний насос (продуктивність 450–700 л/хв) - Колонка для роздачі пального з витратоміром
Паливна система	- Верхнє або нижнє завантаження - Швидке вивантаження через насос або за допомогою гравітації
Додаткове оснащення	- Драмбини, поручні для обслуговування - Клапани API - Протиковзке покриття на верхній частині резервуара
Тип шасі	- Шасі 6x4 або 8x4 (залежно від повної маси) - Виробники: Dongfeng, HOWO, KAMAZ, Shacman, Volvo
Маса автоцистерни	Близько 12 000 кг (порожній резервуар з обладнанням)
Повна маса	38 000 кг (включаючи вантаж)
Тип вантажу	Світлі нафтопродукти (дизель, бензин), технічні рідини
Сертифікати та стандарти	Відповідність ADR (Європейська угода про перевезення небезпечних вантажів), ДСТУ 7475:2016, ГОСТ 27772
Експлуатаційні умови	Робоча температура від -40 °C до +50 °C
Термін служби резервуара	15–20 років за правильного обслуговування

Тому, для вивчення впливу демпферу на інерційні течії та динамічні зміни коливань рідини всередині резервуара, проведемо два експерименти, змодельовані варіанти дії рідини для двох різних конфігураціях цистерни: зі встановленими жорсткими перегородками та зі встановленими гнучкими перегородками. Для даного дослідження, на основі вже розробленої моделі (Рис. 2.23.), створимо модель резервуара (Рис. 2.24.) без конструктивних елементів, котрі не впливають на проведення симуляції та аналізу.

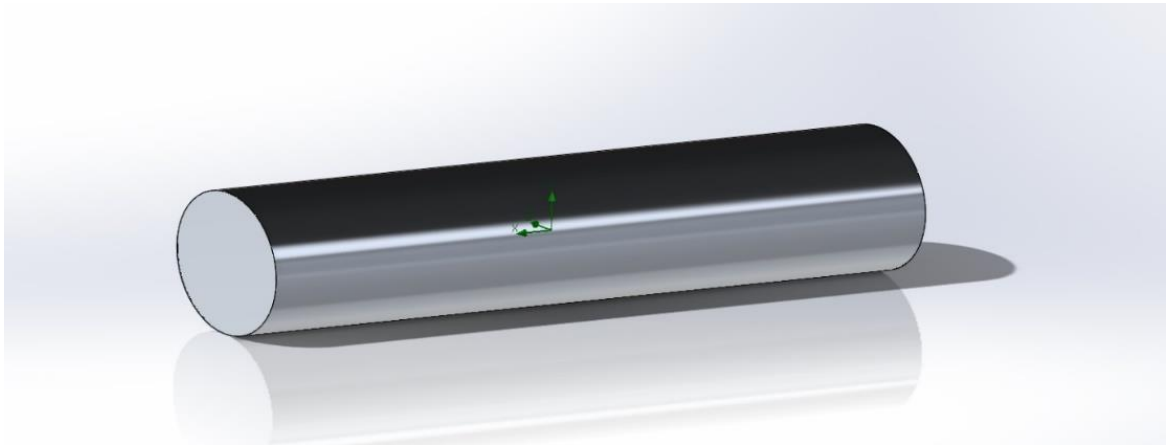


Рис. 2.24. Спрощена 3D-модель досліджуваного резервуара

Для вибраної геометрії резервуара та дослідження внутрішніх явищ, розробимо перегородку, яку будемо аналізувати і порівнювати з конфігурацією без демпфуючих елементів, що зазвичай застосовується при транспортуванні рідин. Для подальших досліджень та моделювання виберемо дизельне паливо як рідину, що заповнює внутрішній об'єм резервуара. Доцільним буде виконати моделювання для цистерни, заповненою наполовину (50%) від загально об'єму резервуара. Загальний об'єм резервуара складає $27,64 \text{ м}^3$, а об'єм рідини при 50% заповнення резервуару — $13,82 \text{ м}^3$.

В Табл. 2.2. та Табл. 2.3. вказані загальні характеристики обраної досліджуваної рідини – дизельне паливо, та характеристики конструктивного матеріалу – алюмінієвий сплав EN AW 5182 H111 (аналоги в Україні – АМг5 (ГОСТ 4784-97); АМг4.5Mn (ГОСТ 4784-97)), так, як завдяки своїм механічним та хімічним властивостям відповідає умовам перевезення світлих нафтопродуктів.

Табл. 2.2. Характеристики дизельного палива

Параметр	Значення	Одиниці вимірювання	Коментар
Густина за 15°C	820–845	кг/м ³	Визначає об'ємні властивості палива; змінюється залежно від сезону.
Кінематична в'язкість за 40°C	2.0–4.5	мм ² /с	Впливає на здатність палива ефективно змащувати деталі.
Температура спалаху	≥ 55	°C	Показник пожежної безпеки при транспортуванні.
Температура самозаймання	~220–280	°C	Вказує на граничні умови експлуатації.
Температура застигання	-10 (літнє), -35 (зимове), -50 (арктичне)	°C	Залежить від регіону та сезону використання.
Вміст сірки	≤ 10	мг/кг	Для стандартів Євро-5 і Євро-6; сірчані сполуки викликають корозію.
Вміст ароматичних вуглеводнів	≤ 11	%	Впливає на викиди шкідливих речовин в атмосферу.
Вміст поліциклічних ароматичних вуглеводнів (ПАУ)	≤ 2	%	Нормується для зниження канцерогенності.

Цетанове число	≥ 51	-	Чим вище, тим краща здатність палива до займання.
Фракційний склад:			Показує випаровуваність палива при нагріванні.
- 10% випаровується за температури	~ 180	$^{\circ}\text{C}$	Вказує на легколеткі компоненти.
- 50% випаровується за температури	~ 260	$^{\circ}\text{C}$	Середній показник для дизельного палива.
- 90% випаровується за температури	≤ 360	$^{\circ}\text{C}$	Обмежує вміст важких фракцій.
Кислотне число	≤ 0.02	мг КОН/г	Наявність кислот сприяє корозії матеріалів цистерни.
Водорозчинні кислоти і луги	Відсутні	-	Їх наявність заборонена.
Вміст води	≤ 200	мг/кг	Вода викликає корозію та знижує якість палива.
Вміст механічних домішок	≤ 24	мг/кг	Домішки можуть засмічувати фільтри і деталі двигуна.
Електропровідність	25–50	pS/м	Знижена електропровідність вимагає антистатичного захисту.

Табл. 2.3. Характеристики матеріалу EN AW 5182 H111

Параметр	Значення	Одиниці вимірювання	Коментар
Густина	2.66	г/см ³	Легкість забезпечує

			зниження маси цистерни.
Межа міцності на розтяг (Rm)	275–350	МПа	Гарантує міцність при динамічних і статичних навантаженнях.
Межа текучості (Rp0.2)	≥ 125	МПа	Матеріал витримує пластичні деформації без руйнування.
Відносне подовження (A50)	≥ 16	%	Показник пластичності та стійкості до вигину.
Модуль пружності	70	ГПа	Визначає жорсткість матеріалу.
Твердість за Брінеллем (HB)	65–75	HB	Підходить для умов експлуатації при помірних навантаженнях.
Температура плавлення	600–655	°C	Стійкий до температурних навантажень до 200°C.
Коефіцієнт теплового розширення	~23.9	мкм/(м·°C)	Враховується при розрахунках з'єднань.
Теплопровідність	~130	Вт/(м·°C)	Висока теплопровідність знижує ризик локального перегріву.
Склад (у %):			
- Алюміній (Al)	Основний компонент		
- Магній (Mg)	4.0–5.0		Підвищує корозійну стійкість і міцність.
- Марганець (Mn)	0.20–0.50		Покращує механічні властивості.

- Залізо (Fe)	≤ 0.35		Контролюється для покращення пластичності.
- Кремній (Si)	≤ 0.20		Знижений вміст забезпечує корозійну стійкість.
Корозійна стійкість	Висока	-	Стійкий до впливу води і світлих нафтопродуктів.
Зварюваність	Висока	-	Підходить для конструкцій з використанням MIG/TIG зварювання.
Стійкість до тріщин	Хороша	-	Мінімальний ризик при деформації і зварюванні.

Для виготовлення жорстких перегородок можна обрати той самий матеріал, з якого і виготовляється цистерна, а для гнучких перегородок оптимальніше всього буде обрати термопластичний поліуретан (TPU), так як даний матеріал має високу механічну міцність, стійкість до дії хімічних речовин і широких діапазон робочих температур. В Табл. 2.4. вказані загальні характеристики термопластичного поліуретану (TPU):

Табл. 2.4. Характеристики матеріалу TPU

Параметр	Значення	Одиниці вимірювання	Коментар
Густина	1.10–1.25	г/см ³	Забезпечує легкість конструкції при достатній міцності.
Межа міцності на розтяг (Rm)	30–55	МПа	Висока міцність для гнучких конструкцій.

Межа текучості (Rp0.2)	10–20	МПа	Гарантує опір матеріалу до деформацій під дією постійного навантаження.
Відносне подовження (A50)	300–700	%	Висока пластичність, що дозволяє матеріалу деформуватися без руйнування.
Твердість за Шором (Shore A)	80–98	Shore A	Регульована твердість залежно від вимог до конструкції.
Температура експлуатації	-50 до +80	°C	Відповідає умовам транспортування дизельного палива.
Температура плавлення	~200	°C	Матеріал зберігає свої властивості в широкому діапазоні температур.
Коефіцієнт теплового розширення	~180–200	мкм/(м·°C)	Важливо враховувати при розрахунку температурних деформацій.
Стійкість до абразивного зносу	Висока	-	Підходить для умов інтенсивного механічного впливу.
Стійкість до хімічного впливу	Висока	-	Стійкий до дизельного палива, масел, жирів та інших нафтопродуктів.
Водопоглинання	≤ 0.1	%	Низьке водопоглинання гарантує стабільність розмірів та механічних властивостей.

Ударна міцність	Висока	-	Здатний витримувати раптові ударні навантаження.
Стійкість до ультрафіолету	Середня	-	Для підвищення необхідне додавання спеціальних стабілізаторів.
Стійкість до старіння	Висока	-	Забезпечує тривалий термін експлуатації без втрати механічних властивостей.
Екологічність	Відповідає сучасним стандартам	-	Може використовуватися для конструкцій, які контактують з паливами.
Зварюваність	Висока	-	Підходить для зварювання гарячим повітрям або ультразвуком.

Висновок

Було проведено загальний огляд актуальної літератури та наукових досліджень, присвячених порівняльному аналізу параметрів жорстких та гнучких перегородок, встановлених всередині резервуара.

Також, в даному розділі було проведено підготовку до виконання наступного етапу дослідження – створення математичної моделі, симуляції інерційних потоків рідини у резервуарі та аналіз ефективності гнучких перегородок в порівнянні з жорсткими. Таким чином, було встановлено початкову геометрію досліджуваного резервуара, обрано конструктивний матеріал для гнучких та жорстких перегородок, а також обрана рідина, що знаходиться всередині обраного резервуара.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ, ПРОВЕДЕННЯ МОДЕЛЮВАННЯ ІНЕРЦІЙНИХ ТЕЧІЙ РІДИНИ У РЕЗЕРВУАРІ З ГНУЧКИМИ ПЕРЕГОРОДКАМИ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ ДАНИХ

Наступним етапом дослідження демпфування інерційний потоків рідини в резервуарах з гнучкими перегородками буде створення математичної моделі резервуара та процесів течії рідини, що відбуваються всередині нього. Після цього, за допомоги програмного CAD-забезпечення SolidWorks зі встановленим модулем дослідження Flow Simulation, проводимо розрахунки дії рідини всередині обраної геометрії резервуара та виконуємо порівняльний аналіз ефективності гнучких перегородок із «класичними» жорсткими.

3.1. Математична модель резервуара та процесів течії рідини

Перед тим, як почати дослідження та проведення процесів моделювання дій течій на обраний резервуар, необхідно сформулювати математичну модель даної роботи. Так, як, для подальшої роботи було обране програмне забезпечення SolidWorks (SolidWorks Flow Simulation), то у якості методики моделювання течій найбільш доцільним буде використати метод ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method) [42].

ALE (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) — це метод дослідження взаємодії рідини та твердих елементів конструкції, розроблений на основі ейлерового методу и методу Лагранжа, поєднав переваги обох підходів [43]. У цій методиці обчислювальні вузли сітки можуть переміщуватися разом із матеріальними вузлами, як у лагранжевих системах, та залишатися фіксованими, як у ейлерових системах, або рухатися довільно відносно матеріальних вузлів (Рис. 3.1.). Це дозволяє моделі ефективно працювати з більшими деформаціями, ніж у випадку лагранжевої моделі, і забезпечує вищу точність порівняно з ейлеровою системою.

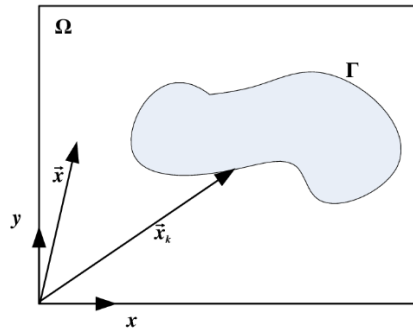


Рис. 3.1. Схема ейлерівської та лагранжевої областей [44]

Метод Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) використовує для вирішення задач рідина-структура застосовується лагранжівське формулювання для структури та ALE-формулювання для матеріалу рідини. У загальному описі ALE вводиться довільна референтна система координат на додаток до лагранжівської та ейлерівської систем координат [45].

В залежності від обраної геометрії, резервуар може бути або сплюснутим, де коротка вісь є віссю симетрії, або витягнутим, де довга вісь є віссю симетрії. (Рис. 3.2.) Переріз резервуара при погляді зверху вздовж вертикальної осі є колом [46]. Точка o є початком ортогональної системи координат $oxyz$, яка розташована в центрі еліпсоїда.

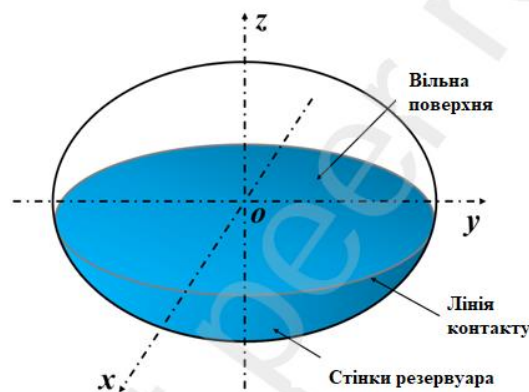


Рис. 3.2. Еліпсоїдальний резервуар, частково заповнений рідиною [46]

Матеріальна похідна відносно референтної системи координат може бути описана рівнянням (3.1). Таким чином, підстановка зв'язку між матеріальною похідною за часом і похідною в референтній конфігурації призводить до рівнянь ALE:

$$\frac{\partial f(X_i, t)}{\partial t} = \frac{\partial f(x_i, t)}{\partial t} + w_i \frac{\partial (x_i, t)}{\partial x_i}, \quad (3.1)$$

де X_i — лагранжівські координати, x_i — ейлерівські координати, w_i — відносна швидкість. Позначимо v як швидкість матеріалу, а u — як швидкість сітки. Для спрощення рівнянь вводимо відносну швидкість $w=v-u$. Таким чином, керівні рівняння для формулювання ALE записуються як:

1) Рівняння маси:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (3.2)$$

де ρ — густина, w_i — відносна швидкість між матеріалом і сіткою.

2) Рівняння імпульсу:

$$\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_i w_j)}{\partial x_j} = \rho b_i + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}, \quad (3.3)$$

Де σ_{ij} — тензор напружень, що визначається як $\sigma = -p + \tau$, τ — зсувне напруження, обчислене на основі моделі матеріалу, а p — тиск, що отримується з рівняння стану.

3) Рівняння енергії:

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial((\rho E + p)w_i)}{\partial x_i} = \rho v_i b_i + \frac{\partial(\sigma_{ij} v_j)}{\partial x_i}, \quad (3.4)$$

де E — повна енергія.

Граничні умови для швидкості та тиску відповідно записуються наступним чином:

1) Граничні умови на стінках резервуара:

$$u \cdot n = 0, \quad (3.5)$$

2) Граничні умови на вільній поверхні:

$$-p + n \cdot \tau \cdot n = 0, \quad (3.6)$$

де n — одиничний вектор нормалі до вільної поверхні, τ — девіаторний тензор напружень.

Для зручності обчислень часто приймається, що швидкість референтної системи дорівнює нулю ($u=0$), і відносна швидкість стає рівною матеріальній ($w=v$). Терміни відносної швидкості в рівняннях (3.3) та (3.4) зазвичай називають

адвективними термінами, які відповідають за перенесення матеріалу через сітку. Саме ці додаткові терміни в рівняннях роблять розв'язання рівнянь ALE більш складним у порівнянні з рівняннями Лагранжа, де відносна швидкість дорівнює нулю.

Чисельне моделювання нестисливих потоків із використанням характеристичного методу Галеркіна може призводити до числових нестабільностей. Щоб уникнути виконання умови Ладиженської-Бреззі-Бабушки (LBB), застосовується інкрементальна версія алгоритму, заснованого на характеристичному розділенні (CBS) [46]. Процедура розв'язання:

1) Обчислення проміжної швидкості:

$$\tilde{u}_i = u_i^n + \Delta t \left[-c_j^n \frac{\partial u_i^n}{\partial x_j} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p^n}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}^n}{\partial x_j} + f_i^n \right] + \frac{\Delta t^2}{2} \left[c_k^n \frac{\partial}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p^n}{\partial x_i} - f_i^n \right], \quad (3.7)$$

2) Визначення тиску:

$$\frac{\partial^2 \rho^{n+1}}{\partial x_i \partial x_i} = \frac{\rho}{\Delta t} \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial^2 \rho^n}{\partial x_i \partial x_i}, \quad (3.8)$$

3) Корекція швидкості:

$$u_i^{n+1} = \tilde{u}_i + \frac{\Delta t}{\rho} \left(\frac{\partial p^n}{\partial x_i} - \frac{\partial p^{n+1}}{\partial x_i} \right), \quad (3.9)$$

Тепер наведені вище рівняння (3.7-3.9) дискретизуються у просторі за допомогою стандартного методу скінченних елементів, при якому область рідини дискретизується як неструктурована сітка з рівнопорядковими функціями форми як для швидкості, так і для тиску. У кожному елементі приймається наступне наближення:

$$u_i = \sum_{\alpha=1}^l N_{\alpha} U_{i\alpha}, \quad (3.10)$$

$$\tilde{u}_i = \sum_{\alpha=1}^l N_{\alpha} \tilde{U}_{i\alpha}, \quad (3.11)$$

$$p = \sum_{\alpha=1}^l N_{\alpha} P_{\alpha}, \quad (3.12)$$

де $u_i = N U_i$, $\tilde{u}_i = N \tilde{U}_i$ та $p = N P$;

Маємо, що $N = [N_1 \ N_2 \ \dots \ N_\alpha \ \dots \ N_m]$, $P = [P_1 \ P_2 \ \dots \ P_\alpha \ \dots \ P_m]^T$,

$$U_i = [U_{i1} \ U_{i2} \ \dots \ U_{i\alpha} \ \dots \ U_{im}]^T, \tilde{U}_i = [\tilde{U}_{i1} \ \tilde{U}_{i2} \ \dots \ \tilde{U}_{i\alpha} \ \dots \ \tilde{U}_{im}]^T$$

Матрична форма рівнянь (3.10-3.12) отримується за допомогою стандартного методу зважувань Гальоркіна через інтегрування за частинами та введення граничних умов:

$$M^{n+1}\tilde{U}_i = M^n U_i^n - \Delta t \left(B^n U_i^n + \frac{1}{\rho} C_i^n P^n + \frac{\mu}{\rho} C_{ij}^n U_j^n - F_i^n - \frac{1}{\rho} E_i^n \right) + \frac{\Delta t^2}{2} \left(K^n U_i^n + \frac{1}{\rho} H_i^n P^n - Q_i^n \right), \quad (3.13)$$

$$A^{n+1} P^{n+1} = \frac{\rho}{\Delta t} C_i'^{n+1} \tilde{U}_i + A^n P^n, \quad (3.14)$$

$$M^{n+1} U_i^{n+1} = M^{n+1} \tilde{U}_i + \frac{\Delta t}{\rho} (C_i^n P^n - C_i^{n+1} P^{n+1}), \quad (3.15)$$

де $M = \int_V N^T N dV$, $B = \int_V \frac{\partial N}{\partial x_j} c_j dV$, $F_i = \int_V N^T f_i dV$, $C_i = \int_V N^T \frac{\partial N}{\partial x_i} dV$,
 $C_i' = \int_V \frac{\partial N^T}{\partial x_i} N dV$, $D_{if} = \int_V \frac{\partial N^T}{\partial x_k} \frac{\partial N}{\partial x_k} dV \cdot \delta_{ij} + \int_V \frac{\partial N^T}{\partial x_j} \frac{\partial N}{\partial x_i} dV$, $E_i = \int_{\Gamma_w} N^T \beta_N (u_i - u_j n_j n_i) dS$,
 $K = \int_V \frac{\partial}{\partial x_k} (N^T c_k) c_j \frac{\partial N}{\partial x_j} dV$, $H_i = \int_V \frac{\partial}{\partial x_k} (N^T c_k) \frac{\partial N}{\partial x_i} dV$, $Q_i = \int_V \frac{\partial}{\partial x_k} (N^T c_k) f_i dV$ та $K = \int_V \frac{\partial N^T}{\partial x_i} \frac{\partial N}{\partial x_i} dV$.

Існує два підходи до реалізації рівнянь ALE, і вони відповідають двом підходам, які використовуються в механіці рідин для реалізації ейлерівської точки зору. Перший підхід передбачає повністю об'єднаний розрахунок рівнянь для обчислювальної механіки рідин; цей підхід використовується різними авторами для задач, де в одному елементі може бути тільки один матеріал. Альтернативний підхід називають поділом операторів (operator split) у літературі, коли розрахунок для кожного кроку часу розбивається на дві фази. Спочатку виконується лагранжівська фаза, в якій сітка рухається разом із матеріалом, у цій фазі обчислюються зміни швидкості та внутрішньої енергії через дію внутрішніх і зовнішніх сил. Рівняння рівноваги:

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} = \sigma_{ij,j} + \rho b_i, \quad (3.16)$$

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} = \sigma_{ij} v_{i,j} + \rho b_i v_i, \quad (3.17)$$

На лагранжівській фазі маса автоматично зберігається, оскільки матеріал не переміщується через межі елементів.

У другій фазі, фазі адвекції, обчислюється перенесення маси, енергії та імпульсу через межі елементів. Це можна розглядати як процес перенесення зміщеної сітки із лагранжівської фази до її початкового стану для ейлерівського формулювання або до довільного розташування в формулюванні ALE за допомогою алгоритмів згладжування. Для уникнення блокування використовується дискретизація з одним інтеграційним пунктом, а для контролю нульової енергії застосовуються методи з керованою в'язкістю [46]. Для розв'язання ударних хвиль застосовуються лінійні та квадратичні терміни, розроблені фон Нейманом і Ріхтмайєром ще в 1950-х роках. Розв'язок виконується за допомогою методу центральної різниці, який забезпечує другу ступінь точності для інтеграції за часом.

Для кожного вузла швидкість і переміщення оновлюються наступним чином:

$$\begin{aligned} u^{n+\frac{1}{2}} &= u^{n-\frac{1}{2}} + \Delta t M^{-1} \cdot (F_{init} + F_{ext}), \\ x^{n+1} &= x^n + \Delta t u^{n+\frac{1}{2}}, \end{aligned} \quad (3.18)$$

де F_{init} — внутрішня сила елемента, а F_{ext} — зовнішня сила, що пов'язана з силами тіла, силами зв'язку та граничними умовами тиску. M — це діагональна матриця мас для кожного елемента сітки. Внутрішня сила обчислюється за формулою:

$$F_{init} = \sum_{k=1}^{N_{elem}} \int B^T \cdot \sigma dv, \quad (3.19)$$

де B — матриця градієнта, а N_{elem} — кількість елементів.

Розмір кроку часу, Δt , обмежується умовою стійкості Куранта, яка може бути виражена так:

$$\Delta t \leq \frac{l}{c}, \quad (3.20)$$

де l — характеристична довжина елемента, а c — швидкість звуку в матеріалі елемента. Для твердих матеріалів швидкість звуку визначається як:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}, \quad (3.21)$$

де ρ — густина матеріалу, а K — модуль стисливості.

Для проблем коливання, де резервуар рухається із прикладеною швидкістю, яка залежить від часу, сітка рідини поводить ся як жорстка сітка, слідуючи за резервуаром. Особливість ALE дозволяє сітці залишатися регулярною, а часовий крок — стабільним, незважаючи на спотворення сітки. Інакше кажучи, в системі відбувається лише рух сітки без її деформацій завдяки формулюванню ALE. Цей метод є дуже корисним для рухомих або обертових резервуарів, де сітка рідини рухається та обертається разом із резервуаром без будь-яких деформацій.

Наступним етапом обчислюється перенесення маса, імпульсу та внутрішньої енергії через межі елементів. Сітка, деформована в лагранжевій фазі, виконується нове мапування у початкову конфігурацію для ейлерової формуляції [48]. Потік матеріалу переміщується між елементами, але різні матеріали залишаються розділеними завдяки відстеженню меж. Зберігаються закони збереження, обчислюються напруги, граничні умови та контактні сили. Ця фаза також може слугувати переходом до іншої сітки.

Після обчислення потоку через межі елемента всі змінні стану оновлюються за наступним алгоритмом, використовуючи метод кінцевих об'ємів (3.22):

$$V^+ M^+ = V^- M^- + \sum_{j=1}^{faces} Flux_j M_j^-, \quad (3.23)$$

де верхні індекси "-" і "+" позначають значення до та після перенесення. Підіндекси j відповідають граничним граням елемента, через які відбувається потік матеріалу, а $Flux_j$ — об'ємні потоки, перенесені між сусідніми елементами. Потік є додатним, якщо елемент отримує матеріал, і від'ємним, якщо елемент його втрачає.

На Рис. 3.3. вказано побудову сітки методом ALE, що виконується в основному через три кроки: (K1) - прийняття $x=u$ для всіх вузлів, і далі (K2) згладжування оновленої сітки, якщо це необхідно [49]. Другий крок виконується ітераційно і поділяється на дві стадії: (K2-1) спершу згладжуються граничні вузли, а (K2-2) – внутрішні вузли.

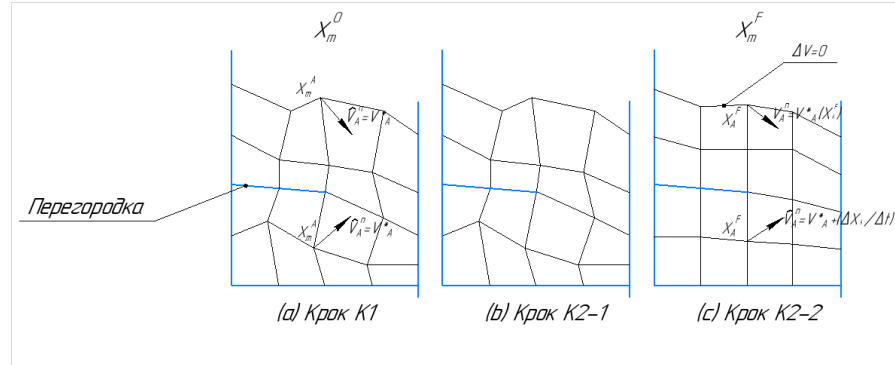


Рис. 3.3. Триетапна процедура оновлення сітки [49]

Звісно, крок (K1) ідентичний перебудові сітки в лагранжевому підході. Якщо позначити як поточне розташування вузла на вільній поверхні А перед перебудовою сітки, його нове розташування після кроку (K1) буде:

$$x^{A*} = x^A + v^A \Delta t, \quad (3.24)$$

де $v^A = v_i^A$ – швидкість сітки. Оновлення всіх вузлів вільної поверхні створює нову сітку x^B .

Далі вирішується, чи необхідно виконувати згладжування, використовуючи ітеративну процедуру згладжування за необхідності. Посилаючись на Рис. 3.3., сусідні вузли граничного вузла А складаються з граничних вузлів елементів, які з'єднані з вузлом А. Координати вузлів вільної поверхні x^P та швидкість сітки v^0 всіх підтримуючих елементів можуть бути переведені у двовимірний лінійний матричний елемент. Спочатку згладжуються дві тангенціальні компоненти координат (на вільній поверхні) вузла А, використовуючи метод простого ітеративного усереднення:

$$(x_a)_A^l = (x_a)_A^{l-1} + \frac{1}{m_A} \sum_{M=1}^{m_A} (x_a)_M, \quad a = t_1, t_2, \quad (3.25)$$

де l – номер ітерації ($l = 1, 2, 3, \dots$). У той час як вертикальні координати вузлів $(x_a)_A$ поверхні змінюються, згладжування поверхні може бути

інтерпольоване на основі геометрії поверхні перед згладжуванням. Після цього визначається кінцеве розташування x_A^F граничного вузла A що має бути переміщене, а також відповідна швидкість сітки $v_A^n = v^0(x_A^F)$ за допомогою функції відображення швидкості.

З іншого боку, оточуючими вузлами будь-якого внутрішнього вузла A є всі вузли (за винятком самого вузла A) елементів, які спільно використовують вузол A . Потім розташування вузла A оновлюється:

$$x_A^l = x_A^{l-1} + \frac{1}{m_A} \sum_{M=1}^{m_A} x_M, \quad (3.26)$$

Тоді кінцеве положення внутрішнього вузла A , який буде переміщений, визначається як $x_A^F = x_A^l$, де його кінцева швидкість $\hat{v}_A^n = v_A^0 + (x_A^F - x_A^c)/\Delta t$. Після того, як ми згладимо всі вузли поверхні та внутрішні вузли, ми обчислюємо загальний об'єм рідини в сітці та порівнюємо початковий об'єм палива для обчислення зміни об'єму ΔV . Для того, щоб уникнути накопичення зміни об'єму протягом процесу поступових кроків часу, ми коригуємо вертикальні координати всіх вузлів вільної поверхні відповідно:

$$(x_n)_A^F = (x_n)_A^F - \frac{\Delta V}{Area(\partial\Omega_F^S)}, \quad (3.27)$$

Це завершує етап перерозбиття сітки для отримання кінцевої сітки X_m^F з оновленими координатами вузлів x_A^F та швидкістю сітки $\hat{v}^n$, що дозволяє вже переходити до моделювання досліджуваних явищ в резервуарі за методом ALE.

Тому, метод ALE є достатньо функціональним і привабливим для розв'язання широкого спектру задач по дослідженню взаємодії рідин і твердих тіл, оскільки допускає довільні великі деформації та дозволяє вільним поверхням змінюватися.

3.2. Дослідження та моделювання поведінки інерційних течій у резервуарі

В даному підрозділі, для подальших досліджень демпфування інерційних течій в резервуарі, проведемо моделювання різкого гальмування, аби наглядно порівняти ефективність жорстких та гнучких перегородок. Для проведення експериментального дослідження з цистерною, заповненою на 50% та для кожної конфігурації резервуара використаємо однакові експериментальні умови: спочатку автоцистерна прискорюється зі швидкістю 2 м/с^2 протягом 10 секунд; потім сповільнюється зі швидкістю $4,2 \text{ м/с}^2$ протягом 7 секунд до повної зупинки; після цього залишається нерухомою протягом 3 секунд. Даний час було обрано через необхідність оптимізації часу симуляції даного дослідження та через технічні умови, що не дозволяють виконати поставлені задачі в більш довгих часових умовах. Резервуар вважаємо розташованим горизонтально, з напрямом дії сили тяжіння по осі X (Рис. 3.4.).

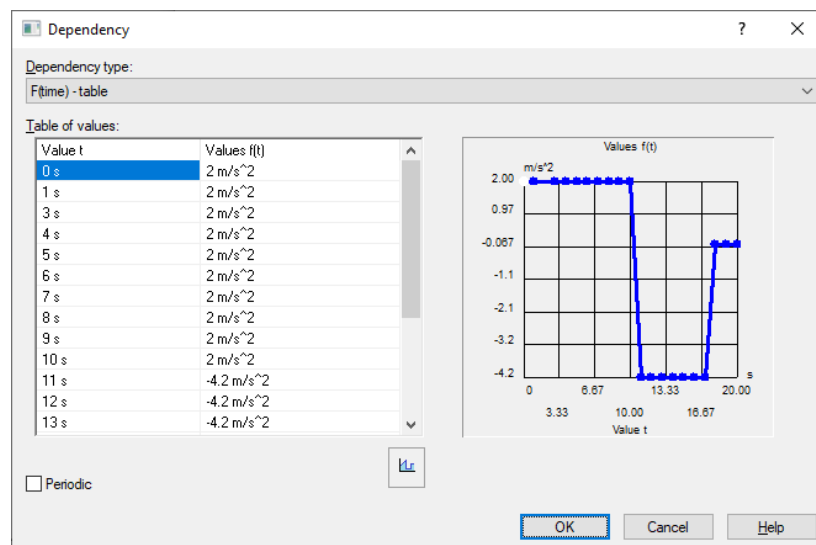


Рис. 3.4. Прискорення по осі X залежно від часу

В програмному середовищі Solidworks створюємо проект, що складається із двох підпроектів, кожен з яких відповідає кожній конфігурації досліджуваного резервуара: з жорсткими перегородками та з гнучкими перегородками (Рис. 3.5.).

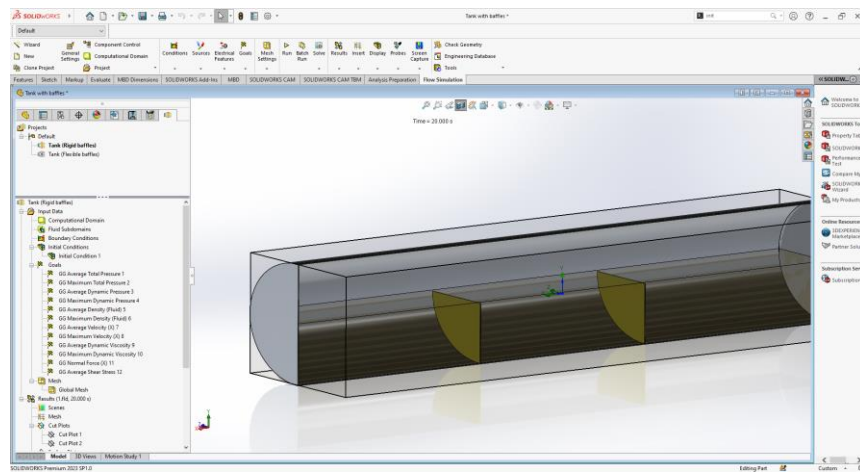


Рис. 3.5. Розроблена досліджувана модель резервуара в середовище SolidWorks

Наступним кроком буде налаштування початкових умов для всіх конфігурацій (Рис. 3.6.),

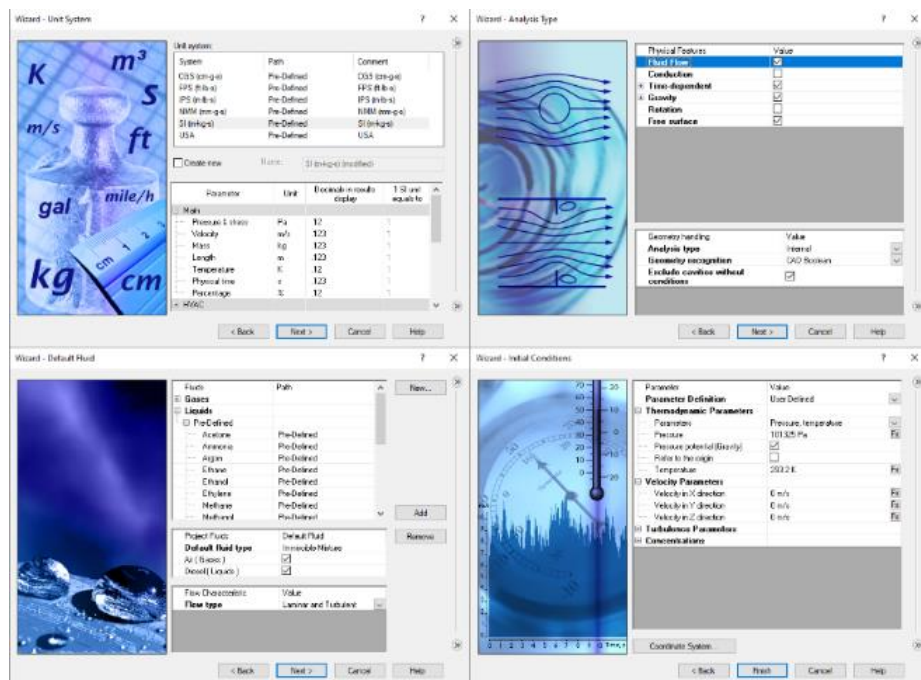


Рис. 3.6. Задання початкових умов моделювання в Wizard Flow Simulation

Після задання початкових умов та геометрії, виконуємо створення сітки та виконуємо її генерацію (Рис. 3.7.).

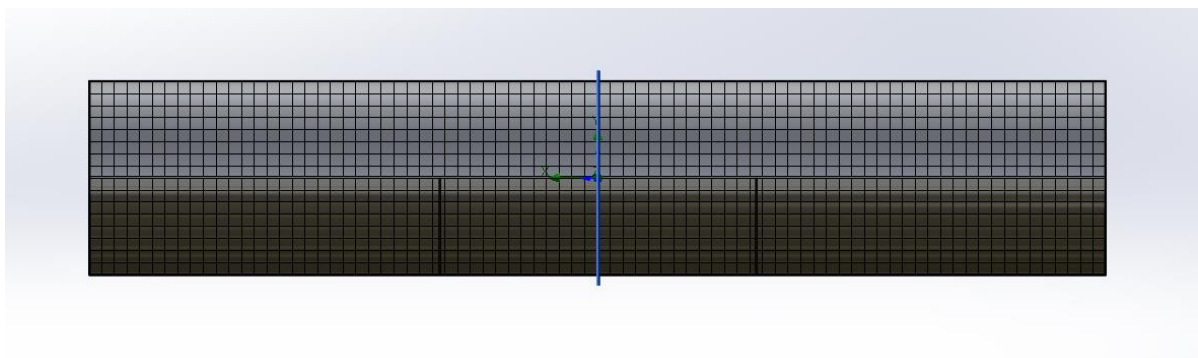


Рис. 3.7. Результати генерації сітки відповідно до встановлених налаштувань

Виконавши дані налаштування, можна приступати к моделюванню явищ коливань рідини у середині резервуара за допомоги встановленого модуля Flow Simulation в середовищі SolidWorks. З їх допомогою можемо детально дослідити внутрішні явища, що виникають під час прискорення та гальмування в резервуарі, та порівняти отримані результати, аби дізнатися, який тип перегородок буде ефективнішим для демпфування рідини.

Після виконання налаштувань, проводимо симуляцію (Рис. 3.8.) та отримаємо результати для подальшого дослідження і порівняння експериментальних значень.

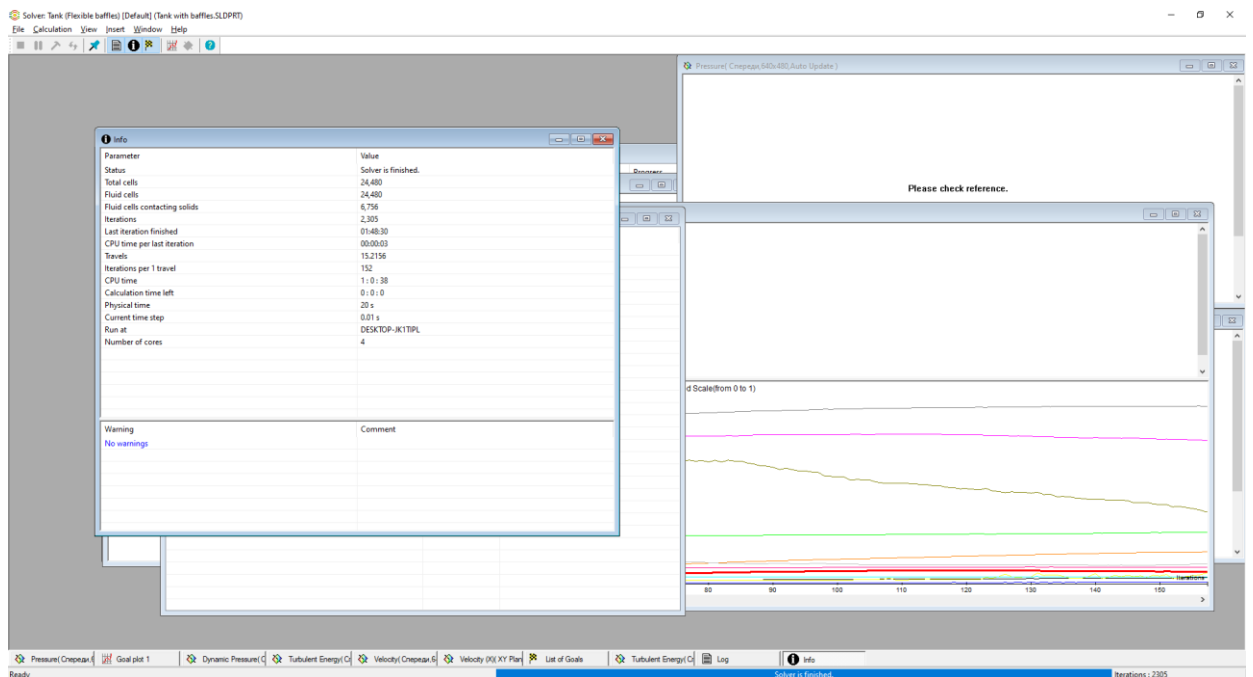
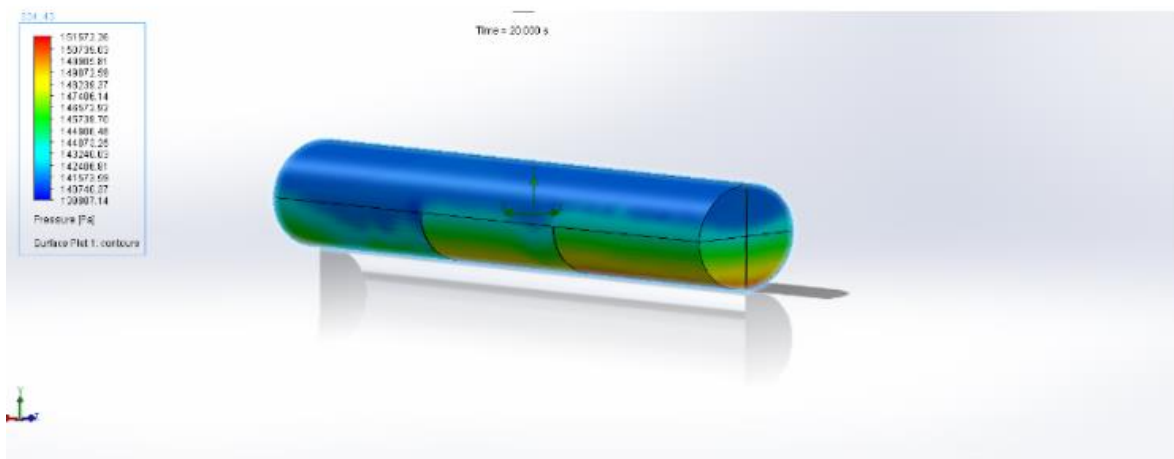
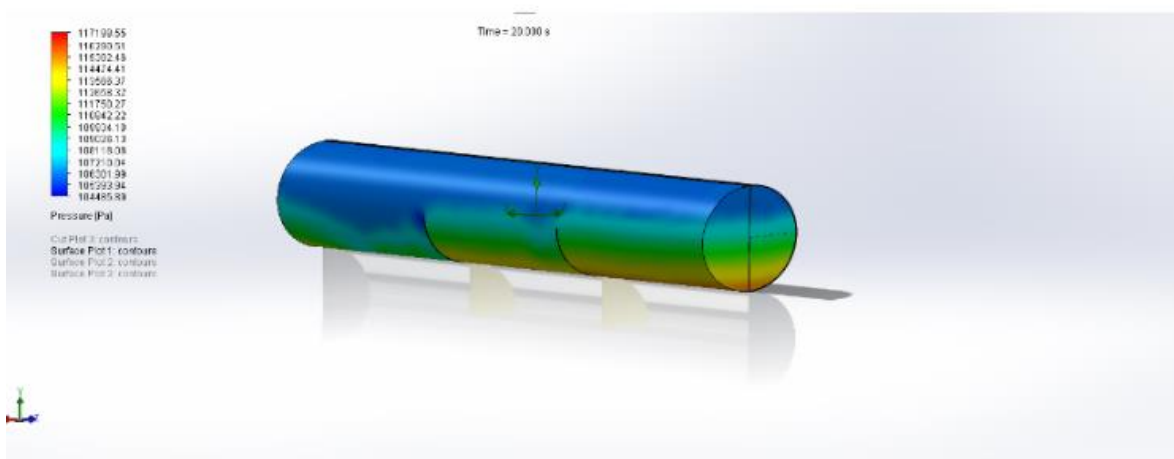


Рис. 3.8. Проведення симуляції в Flow Simulation Solver

Як результат, маємо повну інформацію о проведених симуляціях, що дозволить перейти до наступного етапу даної роботи – аналізу отриманих результатів, що дозволить порівняти ефективність демпфування жорсткими перегородками та гнучкими (Рис.3.9.).



а) Резервуар (Жорсткі перегородки)



б) Резервуар (Гнучкі перегородки)

Рис. 3.9. Результати симуляції, проведених в модулі Flow Simulation: а) з жорсткими перегородками; б) з гнучкими перегородками

На Рис. 3.10. вказано графічні результати моделювання, де наглядно продемонстровано дію потоків рідини всередині резервуару та виконати початковий візуальний аналіз ефективності жорстких (Рис. 3.10.а) та гнучких перегородок (Рис 3.10.б). Попередньо можна встановити, що рідина всередині резервуару приблизно однаково рухається під час швидкого гальмування.

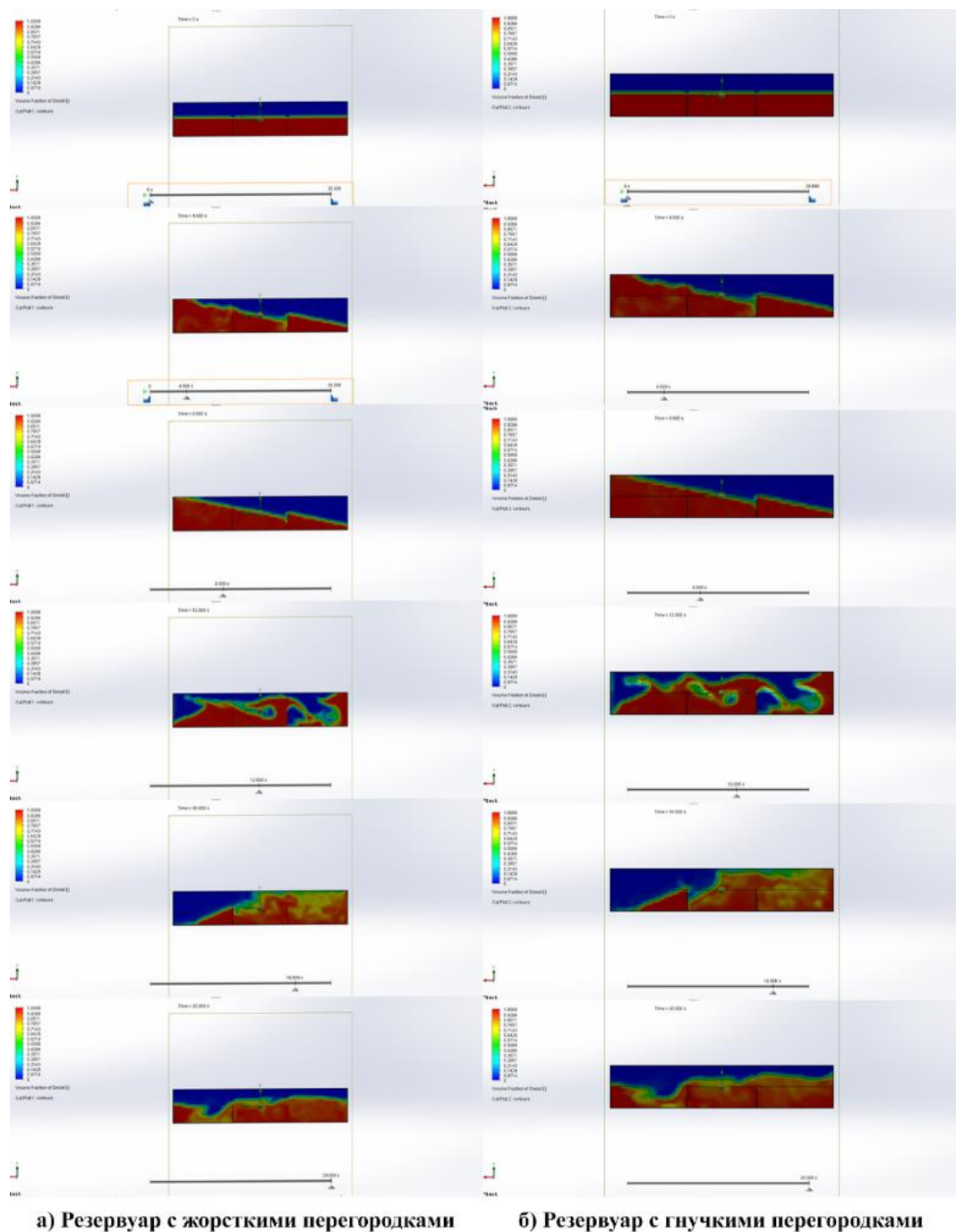


Рис. 3.10. Візуальний аналіз коливань рідини в резервуарі: а) з жорсткими перегородками; б) з гнучкими перегородками

На Рис. 3.11. вказані розподіли тисків рідини для обох варіантів резервуарів. Згідно з попереднього візуального аналізу, спостерігаємо те, що гнучкі перегородки (Рис. 3.11.(б)) є більш ефективними для демпфування рідини під час швидкого гальмування, ніж в конфігурації з жорсткими перегородками (Рис. 3.11.(а)). Але більш детальний аналіз буде проведено в наступному розділі.

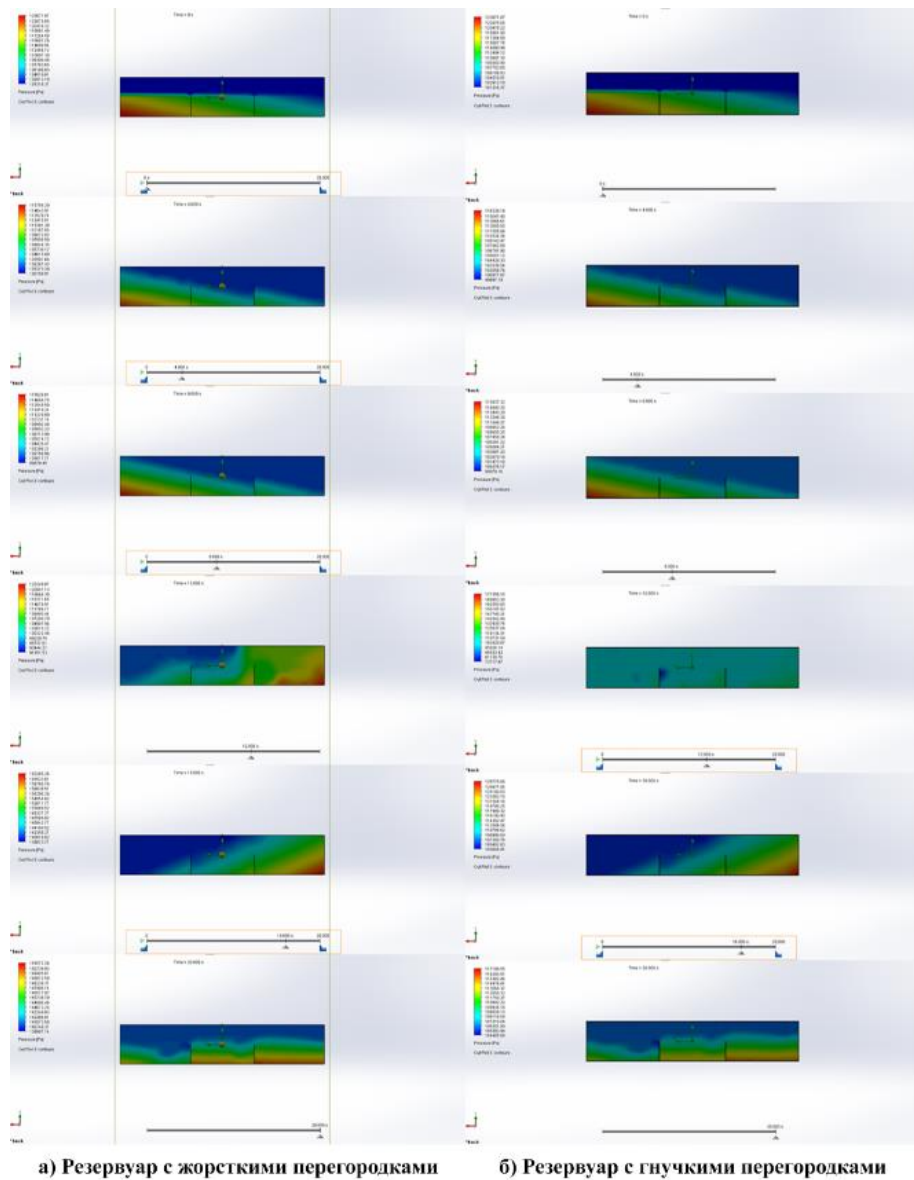


Рис. 3.11. Візуальний аналіз розподілу тисків рідини в резервуарі: а) з жорсткими перегородками; б) з гнучкими перегородками

На даному етапі виконання моделювання, можна зробити висновок, що функціонал САПР – SolidWorks та його модуля Flow Simulation дозволяє провести реалістичні числові симуляції гідродинамічних процесів для подальшого порівняльного аналізу отриманих даних. Проведені симуляції фізичних коливань рідини під час гальмування в резервуарі, з урахуванням реальних фізичних та геометричних параметрів досліджуваного резервуара та рідини всередині, дозволяють провести детальний аналіз ефективності кожного з двох типів перегородок.

3.3. Аналіз отриманих результатів

В даному розділі буде проведений ретельний аналіз отриманих під час симуляції та моделювання поведінки рідини у резервуарі аналіз, метою якого є порівняння ефективності гнучких перегородок з жорсткими. Аналіз отриманих даних дозволить встановити різницю взаємодії перегородок з рідиною під час гальмування, порівняти їх ефективність та підтвердити, або спростувати, необхідність установки та використання гнучких перегородок в порівнянні з традиційними жорсткими.

Наступним кроком буде виконання порівняльного аналізу отриманих даних двох обраних конфігурацій досліджуваного резервуара. Вказані вище графічні зображення (Рис. 3.9. - 3.11.) дозволяють спостерігати візуальні зміни положення рідини, але є недостатніми для повного порівняльного аналізу ефективності гнучких та жорстких перегородок. Числові розрахунки, виконані в модулі Flow Simulation вже дають можливість порівняти більш детально кожен із характеристик дослідження.

Найдоцільнішим для аналізу демпфування інерційних течій буде обрати характеристики, що ґрунтуються на фізичній суті прогресу:

На Рис. 3.11. та Рис. 3.12. вказано графіки середньої швидкості та максимальної швидкості руху рідини, що дає змогу оцінити загальний характер руху рідини та вплив демпфування на потік, а також відображає інтенсивність турбулентності та швидкість потоку в найшвидших його ділянках відповідно.



Рис. 3.11. Графік залежності середнього значення швидкості потоку від зміни часу



Рис. 3.12. Графік залежності максимального значення швидкості потоку від зміни часу

Порівнюючи результати, отримані під час дослідження середньої та максимальної швидкості течій рідини, то можна зробити попередній висновок: гнучкі перегородки є більш ефективний вплив на демпфування інерційних течій,

коли як жорсткі перегородки демонструють більшу турбулентність та довший час затухання коливань.

Наступним кроком буде дослідження максимального динамічного тиску (Рис 3.13.) та середнього динамічного тиску (Рис. 3.14.) між двома конфігурація перегородок.



Рис. 3.13. Графік залежності максимального значення динамічного тиску від зміни часу

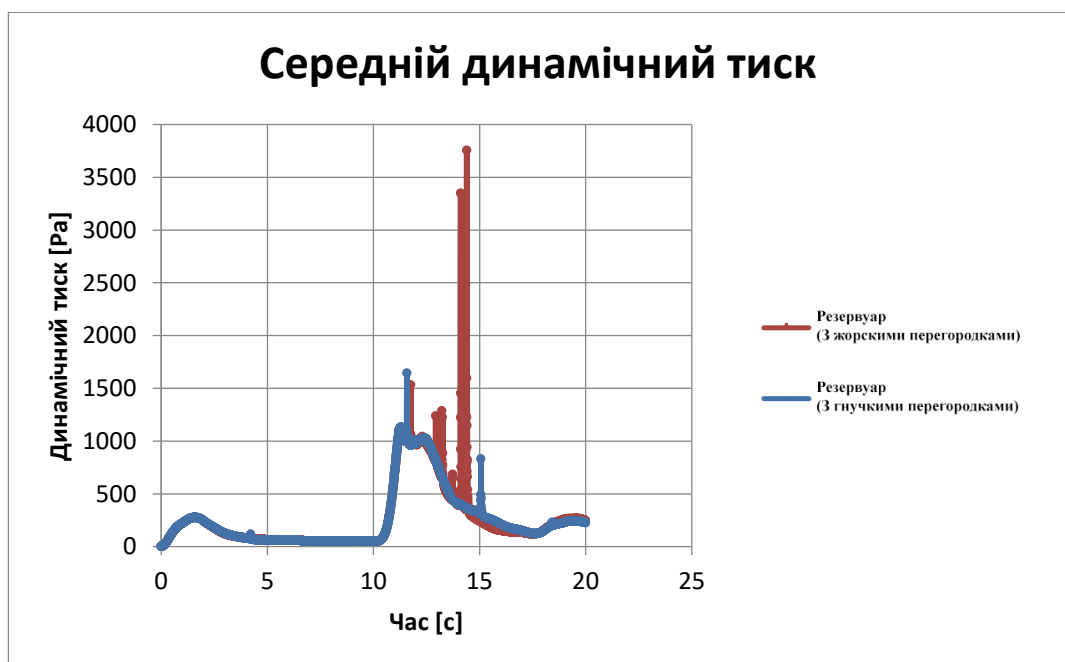


Рис. 3.14. Графік залежності середнього значення динамічного тиску від зміни часу

На основі аналізу графіків динамічного тиску можна зробити попередній висновок, що гнучкі перегородки ефективніше демпфують інерційні течії рідини порівняно з жорсткими. Гнучкі перегородки зменшують пікові значення тиску, розподіляв рівномірно енергію потоку, що сприяє зниженню турбулентності. Натомість, жорсткі перегородки демонструють значні амплітудні коливання, що свідчить про їхню меншу здатність до демпфування та підвищенню ризику виникнення резонансних ефектів.

На Рис. 3.15. зображено графік розподілу середнього зсувного напруження, що відображає середню силу тертя між шарами рідини та поверхнями перегородок/стінок.

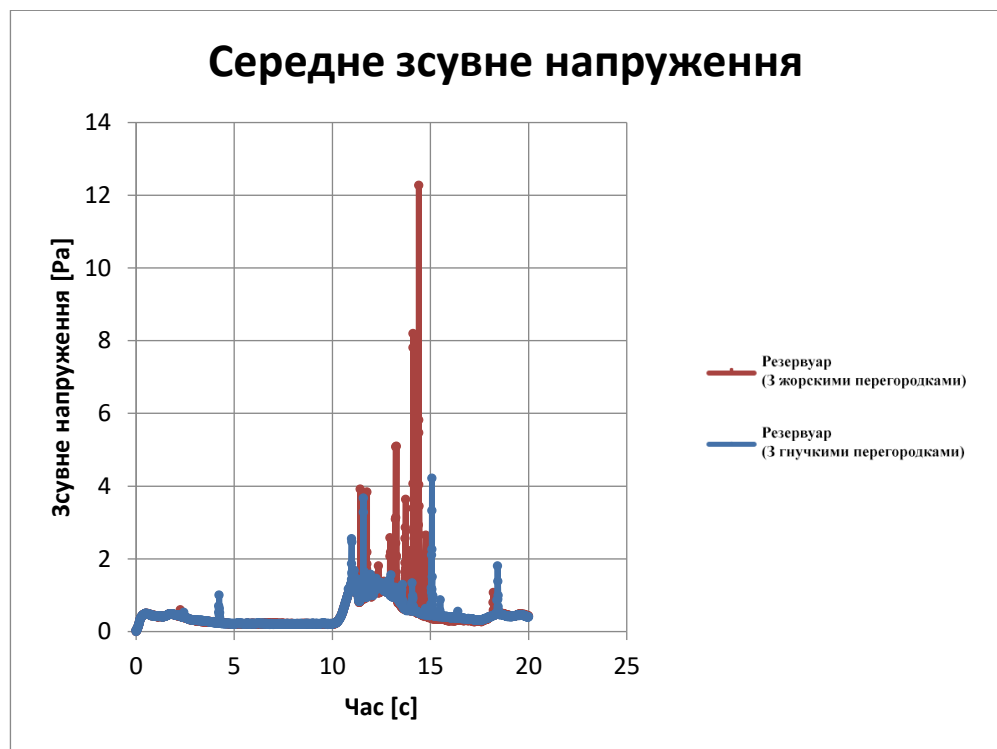


Рис. 3.15. Графік залежності середнього значення зсувного напруження від зміни часу

Аналіз графіка середнього зсувного напруження показує, що жорсткі перегородки створюють значно вищі значення напруження, коли як гнучкі перегородки забезпечують, в порівнянні з першою конфігурацією, забезпечують більш стабільну роботу.

Наступним кроком проведемо аналіз результатів повного тиску рідини, вказаних на Рис. 3.16. та Рис. 3.17.

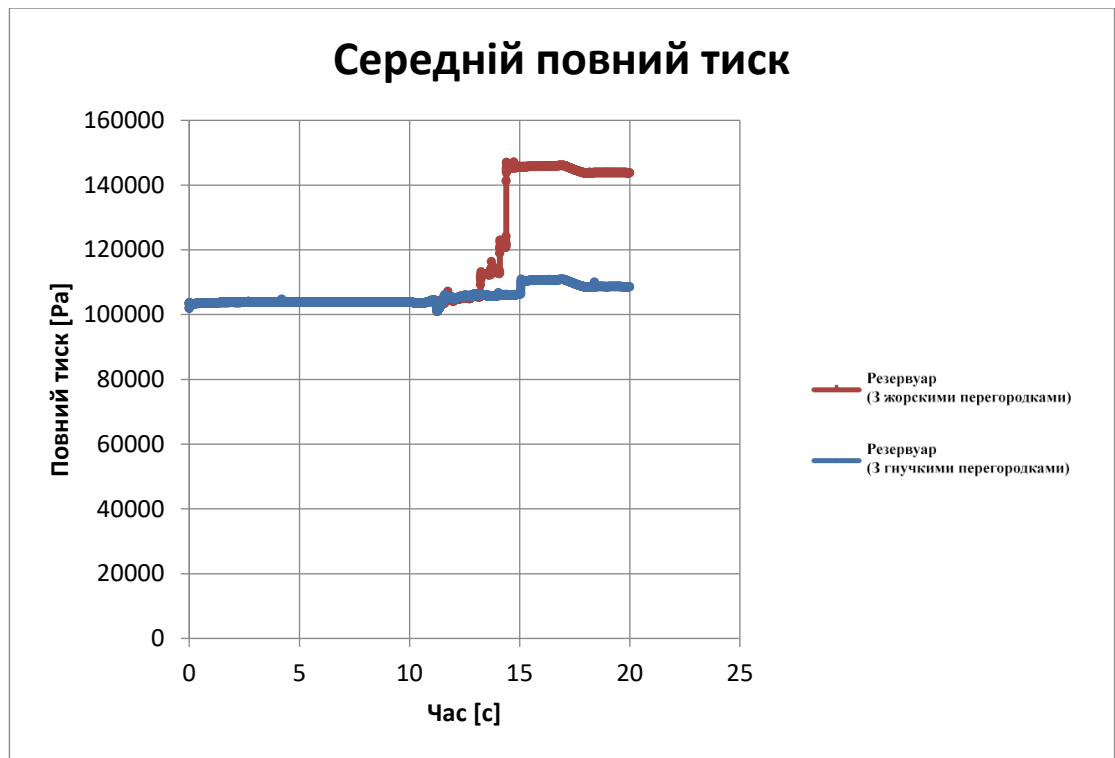


Рис. 3.16. Графік залежності середнього значення повного тиску від зміни часу

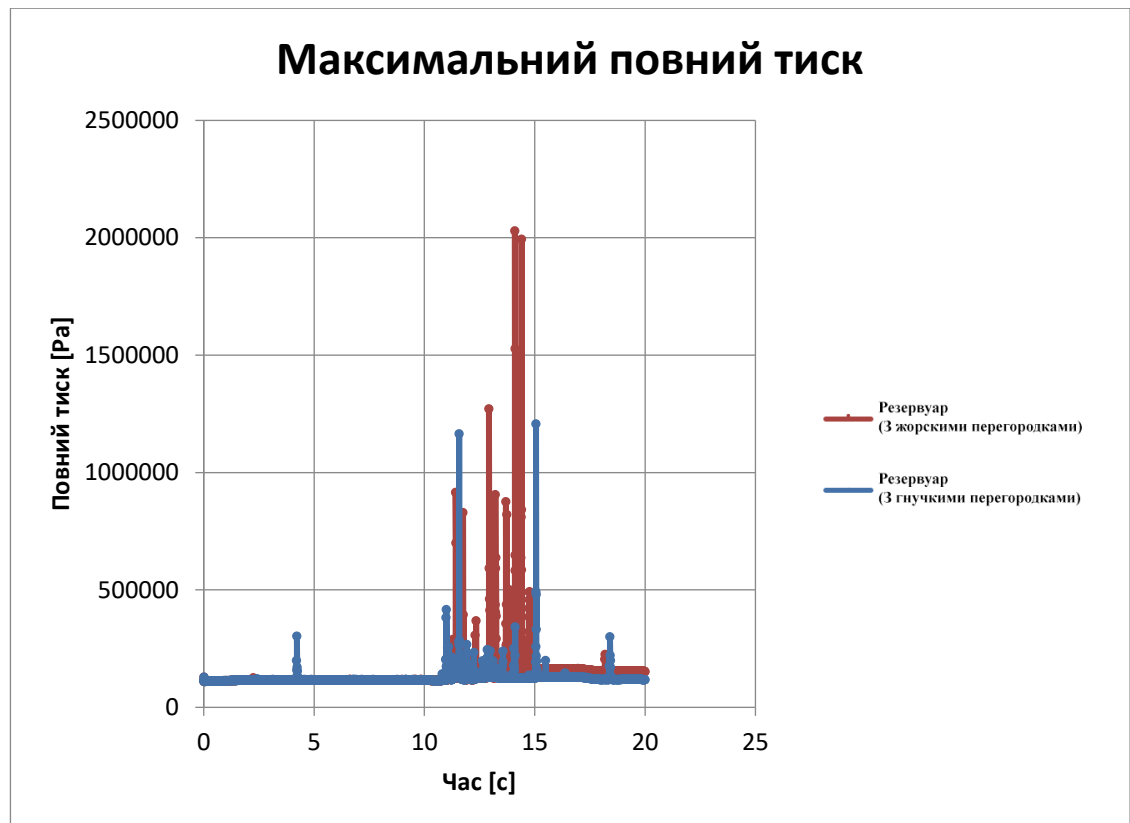


Рис. 3.17. Графік залежності максимального значення повного тиску від зміни часу

Аналіз графіків залежності максимального та середнього значень повного тиску від зміни демонструє, що гнучкі перегородки в конструкції резервуарів

значно знижує зсувні напруження та забезпечує більш стабільний розподіл тиску в порівнянні з жорсткими перегородками.

Отримані результати числових розрахунків основних характеристик рідини/резервуара дозволяють впевнено сказати, що гнучкі перегородки дозволяють покращити демпфування інерційних течій в резервуарі, значно перевищуючи ефективність жорстких перегородок.

3.5. Висновок

Підводячи підсумок аналізу дослідження демпфування інерційних течій в резервуарі, можна сказати, що експериментально, гнучкі перегородки є більш ефективними ніж жорсткі перегородки для реалізації та дослідження поставленої мети даної роботи.

Комплексний підхід до вирішення поставленої задачі та сучасне інженерно-комп'ютерне забезпечення дозволяють продуктивно виконувати складні процеси математичні та фізичні моделювання реальних фізичних процесів. Шляхом проведення моделювання в середовищі САПР - SolidWorks та його модулі Flow Simulation, було продемонстровано та підтверджено, що гнучкі перегородки є більш ефективними під час демпфування рідини. Це дозволяє суттєво знизити амплітуду коливань та стабілізувати динаміку течії в резервуарі, що відкриває можливості до покращення контролю за поведінкою течій рідини під час її зберігання чи транспортування.

Отримані результати підтверджують доцільність застосування гнучких перегородок в конструкції резервуарів та цистерн, що відкриває перспективи для оптимізації перевезення та зберігання рідин, їх подальшого вдосконалення та використання в реальних умовах. Дослідження демонструє, що інтеграція подібних технологій має потенціал суттєво оптимізувати логістичні перевезення, скоротити витрати та підвищити безпеку під час транспортування.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Розробка інноваційних рішень для забезпечення безпеки та ефективності роботи резервуарів із рідиною є важливим завданням сучасної інженерії. Одним із ключових викликів у цій сфері є демпфірування інерційних потоків рідини, що виникають у резервуарах під час транспортування чи експлуатації. Надмірна динамічна взаємодія рідини з внутрішніми стінками резервуара може призводити до механічних пошкоджень, зменшення терміну служби обладнання та створення ризиків для безпеки.

Метою даного стартап-проекту є створення гнучких внутрішніх перегородок, які здатні ефективно демпфірувати інерційні потоки рідини. Це інноваційне рішення спрямоване на мінімізацію впливу динамічних навантажень, підвищення стійкості резервуарів та зменшення витрат на їх обслуговування [50-51].

У цьому розділі представлено аналіз ринкових можливостей, технологічних аспектів, конкурентного середовища та перспектив впровадження стартап-проекту. Спеціальна увага приділяється перевагам запропонованого рішення та його потенціалу для використання в різних галузях, включно з транспортною, нафтохімічною та авіаційною промисловістю.

4.1. Опис ідеї проекту

4.1.1. Ідея проекту полягає у створенні та впровадженні гнучких внутрішніх перегородок для резервуарів із рідиною, які здатні ефективно демпфірувати інерційні потоки. Гнучкі перегородки виготовляються з інноваційних полімерних матеріалів, що поєднують високий рівень еластичності, міцності та хімічної стійкості. Їхнє використання дозволяє знизити динамічні навантаження на резервуари під час транспортування чи експлуатації, зменшити ризики пошкоджень і підвищити безпеку систем зберігання рідин.

У Табл. 4.1. наведено дані щодо змісту ідеї, можливі напрямки застосування та основні вигоди, які отримують потенційні користувачі даної продукції.

Табл. 4.1. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Впровадження гнучких перегородок для демпфування інерційних потоків	1. Транспортні резервуари (автоцистерни, вагони-цистерни)	Зменшення інерційних навантажень, підвищення безпеки транспортування
	2. Паливні баки літаків	Зменшення зміщення центру ваги баку, підвищення стійкості

4.1.2. Для дальшої оцінки переваг запропонованої ідеї порівняємо з існуючими аналогами та альтернативними варіантами демпфування рідини та виконаємо аналіз основних техніко-економічних характеристик, які визначають рівень конкурентоспроможності розробки, що вказано в Табл. 4.2.

Табл. 4.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конкурент 1	Конкурент 2			
1.	Легкість монтажу та демонтажу	S	W	N	Необхідність спеціалізованих матеріалів	Проста встановлення	Економія часу на встановлення

2.	Універсальність використання	N	W	S	Висока початкова вартість	Середній показники універсальності використання	Підходить для більшості рідин
3.	Стійкість до хімічних речовин	S	W	N	Обмежена температурна стійкість	Середній показник хімічної стійкості	Висока довговічність
4.	Екологічність	S	W	N	Потребує модернізації технологій	Відсутність токсичних відходів	Перероблювальний матеріал

Проведений попередній аналіз дозволяє виконати даний висновок: впровадження гнучких перегородок в будову резервуарів має значні конкурентні переваги та може бути використано для оптимізації та покращенню безпечності перевезень різних видів рідин та нафтопродуктів.

4.2. Технологічний аудит

Технологічний аудит є важливою складовою процесу розробки та впровадження інноваційного продукту. Метою цього етапу є визначення технологічної здійсненності ідеї проекту, аналіз доступних технологій для її реалізації та оцінка їхньої відповідності вимогам ринку. Результати проведеного аудиту дозволять виконати оцінку готовності проекту до реалізації,

обґрунтування вибору технічних рішень та розробки рекомендації для подальшого впровадження (Табл. 4.3).

Табл. 4.3 Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Виготовлення гнучких внутрішніх перегородок для резервуарів автоцистерн	Екструзія для створення полотен з TPU; лиття під тиском для кріплень та ущільнювачів	Наявні	Доступні
2.	Створення герметичних з'єднань для перегородок	Термозварювання або високочастотне (ВЧ) зварювання для забезпечення герметичності швів	Наявні	Доступні
3.	Ламінування перегородок для додаткової міцності	Ламінування TPU на текстильну основу для підвищення міцності та стійкості до зносу	Наявні	Доступні
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Комбіноване використання екструзії для виготовлення полотен із TPU, лиття під тиском для створення кріплень, а також термозварювання				

Проведений аналіз показує, що всі необхідні технології для реалізації проекту є доступними та адаптованими до сучасних умов. Виробництво гнучких перегородок може бути організовано з використанням існуючих технологій полімерної інженерії. З'єднання та монтаж також не вимагають значних модифікацій існуючих резервуарів, що спрощує впровадження проекту на ринок.

4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

4.3.1. Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів [52].

Тому, для подальшого аналізу всіх можливостей для запуску стартап-проекту вкажемо попередні характеристики ринку (Табл. 4.4.).

Табл. 4.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Головних гравців	Flexitank Group, Liquitote, Tank Solutions, місцеві виробники
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	\$1.2 млрд на ринку мобільних резервуарів
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростання на 5-7% щорічно
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Сертифікація, високі початкові інвестиції
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Стандарти ISO 9001, місцеві екологічні норми, стандарти на резервуари
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	8-12% залежно від сегменту галузі

4.3.1. Надалі визначаються потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формується орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (Табл. 4.5).

Табл. 4.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1	Безпечне транспортування	1. Нафтопереробка і транспортування; 2. Хімічна промисловість; 3. Агропромисловість; 4. Харчова промисловість;	1. Різні типи рідини 2. Різні обсяги рідини 3. Різна хімічна стійкість рідини 4. Вимоги до безпеки перевезень 5. Місцеві стандарти та екологічні норми	1. Стійкість до ударних навантажень 2. Хімічна стійкість 3. Хімічна інертність 4. Простота використання та обслуговування 5. Сертифікація 6. Легкість очищення 7. Герметичність

4.3.3. Після визначення потенційних груп клієнтів, проводимо аналіз ринкового середовища: складаємо таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту та факторів, що створюють перешкоди для їх реалізації (Табл. 4.6 – 4.7).

Табл. 4.6. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Висока вартість сертифікації	Зростання початкових витрат	Шукати партнерів для тестування
2	Сильна конкуренція	Наявність компаній із дешевшими рішеннями	Акцент на унікальних перевагах

Табл. 4.7. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1	Потреба в екологічних рішеннях	Нові регуляторні вимоги	Розробити екологічно безпечний продукт
2	Ріст попиту на мобільні резервуари	Зростання транспортування рідин	Активне маркетингове позиціонування

4.3.4. Надалі проводиться аналіз пропозиції: визначаються загальні риси конкуренції на ринку (Табл. 4.8).

Табл. 4.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції - монополія/олігополія/ монополістична/чиста	Олігополія	Вихід через інноваційні продукти, демонстрація унікальних переваг
2. За рівнем конкурентної боротьби - локальний/національний/ ...	Національний	Пошук можливостей експорту, активне маркетингове просування
3. За галузевою ознакою - міжгалузева/ внутрішньогалузева	Внутрішньогалузева	Поліпшення характеристик продукції, зміцнення відносин із постачальниками
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-родова - товарно-видова - між бажаннями	Товарно-видова	Акцент на новизні технології та ефективності
5. За характером конкурентних переваг - цінова / нецінова	Нецінова	Інвестування в дослідження, підкреслення

		екологічності та довговічності продукції
6. За інтенсивністю - марочна/не марочна	Марочна	Побудова впізнаваності бренду, участь у виставках та конференціях

4.3.5. Після проведення аналізу конкуренції проводиться більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (Табл. 4.9.).

Табл. 4.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	На ринку відзначається тенденція до зростання числа компаній	Вхід на ринок обмежено тривалими тестуваннями	Якість продукції і її обсяги виробництва напряду залежить від постачальників	Надання гарантій та сервісного обслуговування протягом певного терміну часу	Конкуренція з боку виробників товарів-замінників

За результатами аналізу таблиці можна зробити висновок щодо принципової можливості роботи на ринку з огляду на конкурентну ситуацію: спостерігається конкурентна боротьба, але для впровадження нового продукту не знадобиться багато часу, оскільки пропонується продукт, який вже існує на ринку, з покращеними характеристиками. Але треба враховувати, що існує загроза з боку товарів-замінників.

4.3.6. На основі аналізу конкуренції, проведеного в (Табл. 4.9.), урахуванням характеристик ідеї проекту (Табл. 4.1.), вимог споживачів до товару (Табл. 4.5.) та факторів маркетингового середовища (Табл. 4.6 – 4.7) визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз оформлюється за Табл. 4.10.

Табл. 4.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Інноваційність технології демпфування	Використання гнучких перегородок дозволяє ефективно знижувати інерційні потоки в резервуарах, що підвищує безпеку і зменшує зношення конструкцій порівняно із традиційними рішеннями.
2	Екологічність	Матеріали, які використовуються для гнучких перегородок, є хімічно інертними і можуть бути перероблені, що відповідає сучасним екологічним стандартам і трендам.
3	Низька вага і простота інтеграції	Гнучкі перегородки мають низьку вагу, легко транспортуються та встановлюються навіть у вже існуючі резервуари, що знижує витрати на монтаж і забезпечує універсальність рішення.
4	Довговічність матеріалів	TPU володіє високою зносостійкістю, стійкістю до впливу хімічно агресивних середовищ, широкого діапазону температур, а також до механічних навантажень, що забезпечує тривалий термін служби.
5	Зниження витрат на обслуговування	Перегородки допомагають зменшити ризик пошкоджень стінок резервуара завдяки ефективному демпфуванню потоків, що знижує витрати на ремонт та технічне обслуговування резервуарів.
6	Глобальна відповідність стандартам	TPU відповідає міжнародним стандартам якості та безпеки, зокрема ISO 9001, а також може використовуватися в контакті з харчовими продуктами, що розширює можливості впровадження у харчовій промисловості.

4.3.7. За визначеними факторами конкурентоспроможності (Табл. 4.10) проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (Табл. 4.11).

Табл. 4.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «FluidGuard»

№ п/п	Фактор конкурентоспр оможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з ... (назва підприємства)						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Інноваційність технології	18						✓	
2	Екологічність матеріалу	17						✓	
3	Низька вага і простота інтеграції	15					✓		
4	Довговічність матеріалу	19						✓	
5	Зниження витрат на обслуговуванн я	16				✓			
6	Відповідність стандартам	14				✓			

4.3.8. На основі SWOT-аналізу розробляються альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок (Табл. 4.12.).

Табл. 4.12. SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: - Інноваційність технології, що значно перевершує аналоги; - Екологічність TPU, відповідність сучасним стандартам; - Простота монтажу та інтеграції перегородок у існуючі резервуари; - Довговічність та стійкість матеріалу до агресивних середовищ; - Зниження витрат на обслуговування резервуарів.	Слабкі сторони: - Високі початкові витрати на сертифікацію та запуск; - Обмежений доступ до спеціалізованих постачальників TPU; - Необхідність демонстрації довговічності в польових умовах; - Висока залежність від початкових інвестицій;
--	--

	5. Конкуренція з дешевшими, хоча менш ефективними замінниками;
Можливості: 1. Зростаючий попит на екологічні рішення; 2. Підвищення попиту на мобільні резервуари; 3. Потенціал для виходу на міжнародний ринок; 4. Підтримка регуляторів, що вимагають відповідності стандартам безпеки; 5. Розширення використання технології в «традиційних» галузях.	Загрози: 1. Наявність сильних конкурентів із старими виробниками; 2. Складність отримання патентного захисту; 3. Можливість появи вдосконалених замінників; 4. Довгі терміни окупності проекту; 5. Висока вартість матеріалів TPU.

Обрана альтернатива для впровадження стартапу полягає у початковій орієнтації на хімічну промисловість та транспортні компанії. Ці сегменти є перспективними завдяки високому попиту на інноваційні рішення для підвищення безпеки та ефективності.

Виробництво перегородок із TPU не потребує створення нових технологій, оскільки можна використовувати наявне обладнання. TPU як матеріал є доступним, а його сертифікація за міжнародними стандартами дозволяє швидко вийти на ринок.

Інтеграція продукту в резервуари хімічної та нафтової промисловості або транспортування рідин можлива протягом 6–12 місяців, що робить строки реалізації відносно стислими. Окрім цього, зниження витрат на обслуговування резервуарів і висока довговічність матеріалу полегшують переконання клієнтів у вигодах продукту.

Зосередження на цих сегментах забезпечить швидкий старт і можливість масштабування проекту. Успішне впровадження відкриє шлях до розширення в харчову та агропромисловість, що дозволить вийти на нові ринки.

4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

4.4.1. Розроблення ринкової стратегії передбачає першим кроком визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (Табл. 4.13).

Табл. 4.13. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів в сприйнятті продукту	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Нафтохімічна промисловість	+	Високий	Середня	Відносно проста
2	Транспортні компанії	+	Високий	Середня	Середня
3	Харчова промисловість	-	Низький	Висока	Складна
Які цільові групи обрано: Нафтохімічна промисловість та транспортні компанії					

За результатами аналізу потенційних груп споживачів (сегментів) визначена стратегія охоплення ринку: компанія працює з основними користувачами ринку перевезень рідин та нафтопродуктів, пропонуючи стандартизовану програму (включно із характеристиками товару/послуги), значить використовується масовий маркетинг.

4.4.2. Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку (Табл. 4.14).

Табл. 4.14. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку *
1	Розвиток ринку	Масовий маркетинг	Низькі витрати створюють бар'єр входу для нових конкурентів і одночасно хороший захист проти товарівзамінників	Стратегія лідерства по витратах
2	Розвиток товару	Диференційований маркетинг	Відмітні властивості товару і завойована прихильність клієнтів захищають фірму і від товарівзамінників	Стратегія диференціації
3	Більш глибоке проникнення на ринок	Концентрований маркетинг	Задоволення потреб вибраного цільового сегменту краще, ніж конкуренти	Стратегія спеціалізації

На основі таблиці 4.15 обрана базова стратегія розвитку – стратегія диференціації.

4.4.3. Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.15).

Табл. 4.5. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару	Стратегія конкурентної поведінки*
-------	--	--	--	-----------------------------------

		існуючих у конкурентів?	конкурента, і які?	
1	Так	Так	Ні	Стратегія лідера
2	Ні	Так	Ні	Стратегія виклику лідера
3	Ні	Ні	Так	Стратегія наслідування лідеру
4	Так	Ні	Ні	Стратегія заняття конкурентної ніші

На основі Табл. 4.15 стратегія конкурентної поведінки – стратегія лідера.

4.4.4. На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту (Табл. 4.5.), а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку (Табл. 4.14) та стратегії конкурентної поведінки (Табл. 4.15) розробляємо стратегію позиціонування (Табл. 4.16). що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект.

Табл. 4.16. Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформулювати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1	Стійкість до хімічних речовин. Компанії хімічної промисловості потребують рішень, що можуть	Стратегія диференціації	Використання ТРУ, який має хімічну інертність, забезпечує довговічність і надійність продукту.	Інноваційність, Хімічна стійкість, Надійність

	витримувати вплив агресивних середовищ без втрати функціональності.			
2	Ефективне демпфування інерційних потоків. Транспортні компанії прагнуть зменшити ризик пошкоджень під час транспортування і забезпечити безпеку вантажів	Стратегія диференціації	Гнучкі перегородки із дозволяють знизити хвильові навантаження, зменшуючи знос резервуарів.	Ефективність, Безпека, Зниження витрат на обслуговування
3	Простота інтеграції в існуючі системи. Споживачі очікують, що нове обладнання не вимагатиме суттєвих змін у їхніх поточних процесах і конструкціях.	Стратегія диференціації	Легка вага та простота монтажу дозволяють адаптувати продукт до резервуарів будь-якої форми.	Універсальність, Легка інтеграція, Доступність
4	Екологічність та відповідність міжнародним стандартам. Ринок дедалі більше орієнтований на екологічні рішення, що	Стратегія диференціації	TPU є екологічним матеріалом, який піддається переробці, що сприяє відповідності сучасним трендам.	Екологічність, Міжнародна відповідність, Відповідальність перед природою

	відповідають вимогам ISO.			
--	------------------------------	--	--	--

Стартап буде сконцентрований на сегментах з високими вимогами до ефективності та безпеки, таких як хімічна промисловість і транспортні компанії. Основна стратегія — використання унікальних характеристик TPU і побудова асоціації з інноваційністю та надійністю, що забезпечить стабільний попит і можливості для подальшого масштабування.

4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

4.5.1. Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у Табл. 4.17 потрібно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Табл. 4.17. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1	Демпфірування інерційних потоків рідини	Зменшення ударних навантажень на стінки резервуара	Висока ефективність демпфірування
2	Підвищення безпеки транспортування	Зниження ризиків пошкоджень резервуара та втрати рідини	Універсальність для різних типів резервуарів
3	Економія коштів	Скорочення витрат на обслуговування резервуарів	Низька собівартість виготовлення і тривалий термін служби (до 10 років)
4	Адаптація до різних умов використання	Можливість застосування в різних галузях (транспорт,	Простота інсталяції та демонтажу

		авіація, нафтохімія)	
5	Стійкість до агресивних середовищ	Захист від хімічного впливу, корозії та температурних коливань	Використання матеріалу TPU із підвищеною хімічною та механічною стійкістю

4.5.2. Надалі розробляється трирівнева маркетингова модель товару: уточнюється ідея продукту та/або послуги, його фізичні складові, особливості процесу його надання (Табл. 4.18).

Табл. 4.18. Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Задоволення потреби у демпфіруванні інерційних потоків рідини в резервуарах для зменшення навантажень на їхні стінки та підвищення безпеки транспортування. Основна функціональна вигода – зниження динамічних навантажень, що зменшує зношування резервуарів і ризику аварій.		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Матеріал: Термополіуретан (TPU), що забезпечує високу еластичність, міцність та стійкість до хімічного впливу. 2. Механічна міцність: Здатність витримувати постійні циклічні навантаження протягом 10 років. 3. Гнучкість: Легке адаптування до форм резервуарів будь-якого типу.	Високий показник еластичності (М), хімічна стійкість до нафтопродуктів (Нм).	Вр (виробничі): Висока продуктивність виробництва завдяки використанню сучасних методів формування TPU. Тх (технологічні): Мінімальна трудомісткість монтажу завдяки

	4. Хімічна стійкість: Стійкість до впливу нафтопродуктів, агресивних хімічних речовин та температурних коливань.		легкій вазі перегородок. Тл (тривалість): Розрахований термін експлуатації — до 10 років. Е (екологічні): Екологічно чистий матеріал, що підлягає вторинній переробці. Ор (органолептичні): Нейтральність до запахів, що важливо для резервуарів питної води.
	Якість: Відповідність міжнародним стандартам безпеки транспортування рідин (наприклад, ISO 9001, ADR для небезпечних вантажів).		
	Пакування: Компактне пакування, що забезпечує захист перегородок від механічних пошкоджень під час транспортування.		
	Марка: Продукт представлений під брендом "FluidGuard"		
III. Товар із підкріпленням	До продажу: - Надання технічної документації, інструкцій із монтажу та рекомендацій для вибору моделей під конкретні резервуари. - Адаптація перегородок під нестандартні резервуари (опціонально). - Демо-версія перегородок для тестування у клієнта (за потреби).		
	Після продажу: - Гарантія на 5 років із можливістю її розширення. - Постачання комплектуючих для обслуговування або заміни пошкоджених частин.		

	Технічна підтримка (гаряча лінія, консультації, відеоінструкції).
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: - Патент на конструкцію перегородок і метод їхнього монтажу. - Комерційна таємниця щодо технології виготовлення матеріалу та кріплення. - Захист бренду "FluidGuard" шляхом реєстрації торгової марки.	

4.5.3. Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субституту, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (Табл. 4.19). Аналіз проводиться експертним методом.

Табл. 4.19. Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1	1000–1500 USD	1200–1700 USD	Середній дохід компаній-користувачів: 20 000–50 000 USD на місяць	Нижня межа: 1100 USD. Верхня межа: 1600 USD

4.5.4. Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (Табл. 4.20):

Табл. 4.20. Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Клієнти переважно здійснюють закупівлі великими партіями, орієнтуючись на	Забезпечення прямих поставок, надання технічної документації,	Неглибокий (безпосередні поставки від виробника до клієнта).	Прямий збут через контрактну співпрацю з виробниками

	довгострокове використання товару.	гарантійного обслуговування.		резервуарів та великими транспортними компаніями.
2	Частина клієнтів купує малими партіями для заміни чи тестування.	Продаж невеликих партій через дистриб'юторів, які мають регіональну мережу.	Глибший канал (залучення дистриб'юторів).	Залучення регіональних дистриб'юторів із компетенціями у транспортуванні й обслуговуванні резервуарів.

4.5.5. Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (Табл. 4.21).

Табл. 4.21. Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1	Підприємства транспортної галузі та нафтохімії: орієнтовані на безпеку та економію витрат.	Галузеві виставки, професійні журнали, B2B-платформи.	Безпека, економія коштів, довговічність.	Привернути увагу до інноваційності і перегоронок і підвищення безпеки.	"FluidGuard: Ваша безпека та економія – наші головні пріоритети!"
2	Виробники резервуарів: орієнтація на інтеграцію та відповідність стандартам.	Прямі переговори, галузеві конференції, цифрова реклама на спеціалізованих сайтах.	Простота інтеграції, відповідність міжнародним стандартам.	Переконати у зручності впровадження продукту в існуючі конструкції.	"Легко впровадити – складно перевершити : FluidGuard для ваших резервуарів."
3	Локальні дистриб'ютори : потребують	Прямі контакти, вебінари,	Підтримка постачальника, високий	Мотивувати до співпраці завдяки	"FluidGuard – партнер, який

	високої маржі та технічної підтримки.	презентації продукту.	прибуток на одиницю.	прозорим умовам і технічній підтримці.	підключається про ваш успіх."
--	---------------------------------------	-----------------------	----------------------	--	-------------------------------

4.6. Висновок

Аналіз можливостей ринкової комерціалізації проекту показує, що використання гнучких перегородок із TPU має суттєві конкурентні переваги та може знайти застосування у різних галузях, таких як транспорт, нафтохімія та авіація. Проект базується на удосконаленій технології, яка пропонує нові можливості, зокрема підвищену ефективність демпфірування, тривалий термін служби та стійкість до агресивних середовищ.

Ринок для цього продукту є привабливим, адже попит на подібні рішення зростає, а запропонована ціна є прийнятною для цільової аудиторії. Низькі бар'єри входження та унікальні властивості перегородок створюють сприятливі умови для успішного виходу на ринок, попри наявність аналогів і товарів-субститутів.

Запропонований проект має значний потенціал для впровадження. Завдяки продуманій стратегії збуту, ефективному позиціонуванню та врахуванню потреб клієнтів його реалізація може стати успішною у стислі строки.

ВИСНОВКИ

В даній магістерській дисертаційній роботі було виконано комплексне дослідження процесів демпфування інерційних течій у резервуарах із гнучкими перегородками та експериментальне підтвердження ефективності використання даних перегородок в порівнянні з жорсткими варіаціями.

Внаслідок отримання результатів виконаного дослідження були зроблені такі основні висновки:

1. Було проведено аналіз існуючої літератури та методів демпфування потоків рідини, а також виконано розгляд найбільш розповсюджених математичних моделей.

2. Створена об'ємна 3D-модель резервуара зі встановленими усередині двома типами перегородок: жорсткими та гнучкими в САПР середовищі SolidWorks. Виконано розробка математичної моделі та проведення чисельного моделювання за допомоги модуля Flow Simulation в середовищі SolidWorks, що дозволив проаналізувати та оцінити вплив параметрів гнучких перегородок на ефективність демпфування та порівняти з жорсткими перегородками. Проведено порівняльний аналіз ефективності жорстких та гнучких перегородок в однакових досліджуваних умовах.

Проведений експеримент та матеріали моделювання дослідження підтверджують ефективність демпфування інерційних течій у резервуарах. Це дозволяє сформулювати переваги даної конфігурації перегородки:

- Зменшення амплітуди коливань рідини, що дозволяє гнучким перегородками ефективніше розсіювати кінетичну енергію інерційних течій, що сприяє стабілізації руху рідини.
- Зниження динамічних навантажень на конструкцію резервуара, що сприяє зменшенню тиску на стінки резервуара, підвищуючи його довговічність та безпечність експлуатації.
- Адаптивність до змінних умов, що впливає з гнучкості та еластичності матеріалу перегородки, дозволяючи їй підлаштовуватися під різні режими роботи та динамічні навантаження, забезпечуючи ефективність у широкому діапазоні умов.

3. Виконано розробка стартап-проекту та проведено аналіз ринку попиту та пропозиції відносно виробництва та впровадження гнучких перегородок в головні сфери промисловості: транспорті перевезення, нафтова та хімічна промисловість. Проаналізовано, що для впровадження даного виробу не знадобиться багато часу, оскільки дана продукція не є технологічно складною в виробництві та впроваджує покращені характеристики та нові можливості для вже існуючої продукції.

Практичне значення даної роботи полягає у доказі ефективності демпфування інерційних течій в резервуарах за допомоги гнучких перегородок. Отримані результати підтвердили, що використання гнучких перегородок суттєво знижує амплітуду коливань рідини, зменшує інерційні навантаження на конструкцію резервуара, сприяє підвищенню його стійкості. Гнучкі перегородки відкривають нові можливості для їх впровадження та застосування в різних галузях промисловості: логістична, нафтова та хімічна індустрії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ковальов В. А., Ченьюй В. Структура внутрішніх потоків в'язкої рідини у резервуарах з демпфуючими перегородками // *Mech. Adv. Technol.* – 2022. – Т. 6, № 3. – С. 309–316.
2. Zheng J.-H., Xue M.-A., Dou P., He Y.-M. A review on liquid sloshing hydrodynamics // *Journal of Coastal Disaster and Protection.* – 2022. – Vol. 6, No. 3. – P. 309–316.
3. Gurusamy S., Sanapala V. S., Kumar D., Patnaik B. S. V. Sloshing dynamics of shallow water tanks: Modal characteristics of hydraulic jumps // *Mech. Adv. Technol.* – 2022. – Vol. 6, No. 3. – P. 309–316.
4. Kandasamy T., Rakheja S., Ahmed A. K. W. An analysis of baffles designs for limiting fluid slosh in partly filled tank trucks // *CONCAVE Research Centre. – Concordia University, Canada.* – 2022. – P. 1–10.
5. Korang M. T., Rakheja S., Stiharu I. Three-dimensional analysis of transient slosh within a partly-filled tank equipped with baffles // *Vehicle System Dynamics.* – 2007. – Vol. 45, No. 6. – P. 525–548. DOI: 10.1080/00423110601059013.
6. Akyildiz H. A numerical study of the effects of the vertical baffle on liquid sloshing in two-dimensional rectangular tank // *Journal of Sound and Vibration.* – 2012. – Vol. 331, No. 1. – P. 41–52.
7. D. Liu, P. Lin, A numerical study of three-dimensional liquid sloshing in tanks, *Ocean Engineering* 36 (2009) 202–212
8. Akyildiz, H. (2012). A numerical study of the effects of the vertical baffle on liquid sloshing in two-dimensional rectangular tank. *Journal of Sound and Vibration*, 331(1), 41–52. doi:10.1016/j.jsv.2011.08.002
9. Jung, J. H., Yoon, H. S., Lee, C. Y., & Shin, S. C. (2012). Effect of the vertical baffle height on the liquid sloshing in a three-dimensional rectangular tank. *Ocean Engineering*, 44, 79–89. doi:10.1016/j.oceaneng.2012.01.034
10. Panigrahy, P. K., Saha, U. K., Maity, D. Experimental studies on sloshing behavior due to horizontal movement of liquids in baffled tanks // *Ocean Engineering*. 2009. № 36 (3–4). С. 213–222.

11. Maleki, A., Ziyaeifar, M. Sloshing damping in cylindrical liquid storage tanks with baffles // *Journal of Sound and Vibration*. 2008. № 311. C. 372–385.
12. Jithu, S., Janardhanan, S. Numerical study on the effect of ball baffles in reducing sloshing loads in ship tanks // *SCMS School of Engineering and Technology*, Karukutty, Kerala, India.
13. Promax Baffle Ball 355mm [Электронный ресурс] // *Promax*. URL: <https://www.promax.co.nz/products/transport-tanks/Promax-Baffle-Ball-355mm>.
14. Wang, J., Liu, J., Wang, D. Coupled Responses in a Partially Liquid-Filled Cylindrical Tank with the Single Flexible Baffle under Pitching Excitations // *Shock and Vibration*. 2019. C. 1–15. doi:10.1155/2019/9854187.
15. Wang, J., Zhou, D., Liu, W. Coupled response of liquid in a rigid cylindrical container equipped with an elastic annular baffle // *Meccanica*. 2015. № 51 (9). C. 2045–2058. doi:10.1007/s11012-015-0353-3.
16. Zhang, Z. L., Khalid, M. S. U., Long, T., Chang, J. Z., Liu, M. B. Investigations on sloshing mitigation using elastic baffles by coupling smoothed finite element method and decoupled finite particle method // *Journal of Fluids and Structures*. 2020. № 94. C. 102942. doi:10.1016/j.jfluidstructs.2020.102942.
17. Xue, M.-A., Zheng, J., Lin, P. Numerical Simulation of Sloshing Phenomena in Cubic Tank with Multiple Baffles // *Journal of Applied Mathematics*. 2012. C. 1–21. doi:10.1155/2012/245702.
18. Xue, M., Lin, P., Zheng, J., Ma, Y., Yuan, X., Nguyen, V.-T. Effects of perforated baffle on reducing sloshing in rectangular tank: Experimental and numerical study // *China Ocean Engineering*. 2013. № 27 (5). C. 615–628. doi:10.1007/s13344-013-0052-6.
19. Younes, M. F., Younes, Y. K., El-Madah, M., Ibrahim, I. M., El-Dannanh, E. H. An experimental investigation of hydrodynamic damping due to vertical baffle arrangements in a rectangular tank // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*. 2007. № 221 (3). C. 115–123. doi:10.1243/14750902jeme59.

20. Koh, C. G., Luo, M., Gao, M., Bai, W. Modelling of liquid sloshing with constrained floating baffle // *Computers & Structures*. 2013. № 122. C. 270–279. doi:10.1016/j.compstruc.2013.03.018.
21. Md Arif, U. G., Loo, C.-Y., Kang, H.-S., Punurai, W., Quen, L. K., Lai, G. N.-Y., Chong, W.-T. Suppression of hydrodynamic sloshing in liquefied natural gas tank with floating baffle: Experimental and numerical studies // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. № 463. C. 012111. doi:10.1088/1755-1315/463/1/012111.
22. Zhang, C., Su, P., Ning, D. Hydrodynamic study of an anti-sloshing technique using floating foams // *Ocean Engineering*. 2019. № 175. C. 62–70. doi:10.1016/j.oceaneng.2019.02.014.
23. Koh, C. G., Gao, M., Luo, C. Liquid stabilizing device. *Patent Cooperation Treaty (PCT) of World Intellectual Property Organization*. 2011. PCT/SG2011/00145.
24. Pradeepkumar, K. S., Selvan, V., Satheeshkumar, K. R. P. Review of Numerical Methods for Sloshing // *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2020. T. 8, № XI.
25. Wang, C. Z., Khoo, B. C. Finite element analysis of two-dimensional nonlinear sloshing problems in random excitations // *Ocean Engineering*. 2005. № 32 (2). C. 107–133. doi:10.1016/j.oceaneng.2004.08.001.
26. Cho, J., Lee, H. Numerical study on liquid sloshing in baffled tank by nonlinear finite element method // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2004. № 193 (23–26). C. 2581–2598.
27. Biswal, K., Bhattacharyya, S., Sinha, P. Non-linear sloshing in partially liquid-filled containers with baffles // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 2006. № 68 (3). C. 317–337.
28. Ning, D.-Z., Song, W.-H., Liu, Y.-L., Teng, B. A Boundary Element Investigation of Liquid Sloshing in Coupled Horizontal and Vertical Excitation // *Journal of Applied Mathematics*. 2012. C. 1–20. doi:10.1155/2012/340640.
29. Brebbia, C. A., Walker, S. *Boundary Element Techniques in Engineering*. Newnes-Butterworths, 1980.

30. Ning, D.-Z., Teng, B., Zhao, H.-T., Hao, C.-I. A comparison of two methods for calculating solid angle coefficients in a BIEM numerical wave tank // *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2010. № 34 (1). C. 92–96.
31. Monaghan, J. J. Smoothed particle hydrodynamics // *Reports on Progress in Physics*. 2005. № 68 (8). C. 1703–1759. doi:10.1088/0034-4885/68/8/R01.
32. Yang, Q., Jones, V., McCue, L. Free-surface flow interactions with deformable structures using an SPH–FEM model // *Ocean Engineering*. 2012. № 55. C. 136–147. doi:10.1016/j.oceaneng.2012.06.031.
33. Kim, Y. Numerical simulation of sloshing flows with impact load // *Applied Ocean Research*. 2001. № 23 (1). C. 53–62. doi:10.1016/s0141-1187(00)00021-3.
34. Chen, B.-F., Nokes, R. Time-independent finite difference analysis of fully non-linear and viscous fluid sloshing in a rectangular tank // *Journal of Computational Physics*. 2005. № 209 (1). C. 47–81. doi:10.1016/j.jcp.2005.03.006.
35. Xue, M.-A., Lin, P. Numerical study of ring baffle effects on reducing violent liquid sloshing // *Computers & Fluids*. 2011.
36. Younes, M. F., Younes, Y. K., El-Madah, M., Ibrahim, I. M., & El-Dannanh, E. H. An experimental investigation of hydrodynamic damping due to vertical baffle arrangements in a rectangular tank // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 2017, 221(3), 115–123. doi:10.1243/14750902jeme59
37. Paik, K.-J., Carrica, P.M. Fluid–structure interaction for an elastic structure interacting with free surface in a rolling tank // *Ocean Engineering*, 2014, 84, 201–212. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2014.04.016.
38. Zhao, C., Yu, Y., Hu, X. Liquid sloshing behaviours in an elastic tank and suppression effect of baffles // *Technical University of Munich*, 2024.
39. Garza, L.R., Dodge, F.T. A comparison of flexible and rigid ring baffles for slosh suppression // *AIAA Journal*, 1971.
40. Zheng, X., Zhang, H., Ren, Y., Wei, Z., & Song, X. (2017). Rollover stability analysis of tank vehicles based on the solution of liquid sloshing in partially filled tanks // *Advances in Mechanical Engineering*, 9(6), 168781401770389. doi:10.1177/1687814017703894

41. Zheng, X., Zhang, H., Ren, Y., Wei, Z., & Song, X. (2017). Rollover stability analysis of tank vehicles based on the solution of liquid sloshing in partially filled tanks // *Advances in Mechanical Engineering*, 9(6), 168781401770389. doi:10.1177/1687814017703894

42. Arora, S. and Vasudavan, S. (2017) Analysis of Sloshing Induced Load on Fuel Tank Structure // *Master's Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg*.

43. Xu, J., Wang, J., Souli, M. SPH and ALE formulations for sloshing tank analysis // *The International Journal of Multiphysics*, 2015, 9(3), 209–224. DOI: 10.1260/1750-9548.9.3.209.

44. Mariano F.P., Moreira L.Q., Silveira-Neto A., da Silva C.B., Pereira J.C.F. A new incompressible Navier-Stokes solver combining Fourier pseudo-spectral and immersed boundary methods // *Laboratory Mechanical of Fluids - MFlab, Faculty of Mechanical Engineering - FEMEC, Federal University of Uberlândia - UFU, Uberlândia-MG, Brasil; Instituto Superior Técnico, LASEF, Lisboa, Portugal*.

45. Memoire presente a l'universite du Quebec a Chicoutimi comme exigence partielle de la matrise en ingeniere. https://central.bac-lac.gc.ca/.item?id=MR91633&op=pdf&app=Library&oclc_number=911213140

46. Benson, D.J. Computational methods in Lagrangian and Eulerian hydrocodes // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1992, 99(2–3), 235–394. DOI: 10.1016/0045-7825(92)90042-I.

47. Ma B., Yue B., Yu L., Hao B., Numerical and experimental study on the nonlinear liquid sloshing in ellipsoidal tanks // *Acta Mechanica*. 2024. № 9. C. 5545–5560. DOI: 10.1007/s00707-024-04002-0.

48. Benson, D.J. A mixture theory for contact in multi-material Eulerian formulations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1997, 140(1–2), 59–86. DOI: 10.1016/S0045-7825(96)01050-X.

49. Cho, J.-R., Lee, H.-W., Yoo, W.-S., & Kim, M.-J. (2004). An ALE finite element method for baffled fuel container in Yawing motion // *KSME International Journal*, 18(3), 460–470. doi:10.1007/bf02996111

50. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс]: Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. Київ: НТУУ «КПІ», 2016. 28 с.

51. Федішин, І.Б. Управління проектами в підприємницькій діяльності (опорний конспект лекцій для студентів спеціальності 7.03060101 «Менеджмент підприємницької діяльності» усіх форм навчання). Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2016. 161 с.

52. Grand view Research. [Посилання на електронний ресурс:
https://www.grandviewresearch.com/Filters?search=Tank+baffles&search_submit=