

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
	Розрахунково-пояснювальна записка		
1.	<i>Формування технічного завдання на кваліфікаційну роботу.</i>		
2.	<i>Анотація.</i>		
3.	<i>Вступ.</i>		
4.	<i>Методи математичного моделювання кавітаційної техніки та технології.</i>		
5.	<i>Розроблення 3-Д моделі гідродинамічного кавітаційного апарата статичного типу.</i>		
6.	<i>Результати вимірювання.</i>		
7.	<i>Надійність та довговіність досліджуваного апарата.</i>		
8.	<i>Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.</i>		
9.	<i>Висновки</i>		
10.	<i>Перелік використаної літератури</i>		
	Графічна частина		
1.	<i>Аналіз існуючих конструкцій</i>		
2.	<i>Креслення та схема приєднання</i>		
3.	<i>3-Д модель гідродинамічного кавітаційного апарата</i>		
4.	<i>Розподіл тиску та швидкостей</i>		
5.	<i>Гістограма парогазової фази</i>		
6.	<i>Математична залежність нормального розподілу парогазової фази</i>		
7.	<i>Результати моделювання</i>		

Студент

(підпис)_____
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)_____
(прізвище та ініціали)

Анотація

Тема кваліфікаційної роботи: Удосконалення конструкції гідродинамічного кавітаційного апарата статичного типу на основі чисельного моделювання з використанням програмного забезпечення SolidWorks.

Виконавець: Коваль Андрій Васильович

Навчальний заклад: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Рік виконання: 2024

Обсяг роботи: Розрахунково-пояснювальна записка обсягом 84 сторінок.

Графічна частина: Містить 7 креслення формату А1.

Ключові слова: Гідродинамічна кавітація, чисельне моделювання, парогазова фракція, SolidWorks.

Кваліфікаційна робота присвячена удосконаленню конструкції гідродинамічного кавітаційного апарата статичного типу шляхом чисельного моделювання з використанням програмного забезпечення SolidWorks. Проведено аналіз впливу геометричних параметрів діафрагми, зокрема діаметра отвору, на інтенсивність кавітаційних явищ. Встановлено, що зі збільшенням діаметра отвору зменшується інтенсивність кавітації через зниження швидкості потоку та перепаду тиску.

Використання SolidWorks також дозволило візуалізувати та проаналізувати гідродинамічні параметр апарата, зокрема розподіл тиску у різних зонах. Визначено оптимальні параметри отвору діафрагми, які забезпечують максимальну ефективність кавітаційних процесів при мінімальних енергетичних витратах і зносі обладнання.

Результати роботи можуть бути використані для проектування ефективних кавітаційних апаратів, що застосовуються у промисловості для інтенсифікації процесів у харчовій, хімічній та енергетичній галузях.

Annotation.

Theme of the qualification work: Optimization of the design of a static-type hydrodynamic cavitation apparatus based on numerical modeling results using SolidWorks software

Performer: Koval Andrii Vasylovych

Educational institution: Ternopil Ivan puluj National Technical University

Year of completion: 2024

Scope of work: A calculation and explanatory note of 84 pages.

Graphic part: Contains 7 drawings of A1 format.

Keywords: Hydrodynamic cavitation, numerical modeling, vapor-gas fraction, SolidWorks.

The qualification work is devoted to improving the design of a hydrodynamic cavitation apparatus of a static type by numerical modeling using SolidWorks software. The influence of the geometric parameters of the diaphragm, in particular the diameter of the hole, on the intensity of cavitation phenomena was analyzed. It was found that with an increase in the diameter of the hole, the intensity of cavitation decreases due to a decrease in the flow rate and pressure drop.

The use of SolidWorks also made it possible to visualize and analyze the hydrodynamic parameters of the apparatus, in particular the pressure distribution in different zones. The optimal parameters of the diaphragm opening were determined, which ensure maximum efficiency of cavitation processes with minimal energy consumption and equipment wear.

The results of the work can be used to design efficient cavitation devices used in industry to intensify processes in the food, chemical, and energy industries.

Зміст

Вступ.....	7
1. Методи математичного моделювання кавітаційної техніки та технології.....	9
1.1. Методи, які застосовують для удосконалення проектування обладнання.....	12
1.2. Методи, які використовуються у галузях промисловості.....	14
1.2.1. Статистичні моделі гідродинамічного кавітаційного апарату статичного типу.....	17
1.2.2. Регресійні моделі гідродинамічного кавітаційного апарату статичного типу.....	20
1.3. Мета та завдання роботи.....	24
2. Розроблення 3-Д моделі гідродинамічного кавітаційного апарата статичного типу.....	26
2.1. Розроблення математичної моделі об'єкта.....	26
2.2. Побудова 3Д-моделі гідродинамічного кавітаційного апарату статичного типу.....	29
3. Результати чисельних розрахунків.....	36
3.1. Розроблення алгоритму побудови симуляції потоку рідини у конструкції гідродинамічного кавітаційного апарату статичного типу.....	37
3.2. Результати та порівняння.....	46
4. Розрахунки щодо надійності та довговічності досліджуваного апарата.....	60
4.1. Основні заходи для підвищення надійності та довговічності.....	65
5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	68
5.1. Заходи з охорони праці.....	72
5.2. Заходи з безпеки в надзвичайних ситуаціях.....	74
5.3. Захист при кавітаційних явищах на підприємстві.....	77
Висновки.....	80
Перелік використаної літератури.....	82
Додатки.....	

Вступ

Гідродинамічні кавітаційні апарати статичного типу є важливим елементом сучасних технологічних систем, які використовуються в багатьох галузях промисловості, таких як хімічна, харчова, фармацевтична, енергетична та водоочисна. Їхня здатність генерувати кавітаційні явища забезпечує інтенсифікацію процесів змішування, диспергування, емульгування, очищення та хімічного синтезу. Проте висока інтенсивність кавітації часто супроводжується значними енергетичними витратами, зношенням конструкційних матеріалів через кавітаційну ерозію, а також нестабільністю процесів, що робить питання оптимізації конструкції та підвищення довговічності таких апаратів надзвичайно актуальним.

На сучасному етапі розвитку інженерних технологій особливу увагу приділяють використанню чисельного моделювання для аналізу та вдосконалення конструкції обладнання. Програмне забезпечення SolidWorks із вбудованим модулем Flow Simulation надає широкі можливості для моделювання гідродинамічних процесів, що відбуваються всередині кавітаційних апаратів. Це дозволяє досліджувати вплив геометричних параметрів, таких як діаметр діафрагми, довжина робочої камери, форма та розташування проточних каналів, на ключові показники роботи апарата, включаючи розподіл тиску, швидкість потоку, зони утворення кавітації та їх інтенсивність.

Наукова новизна роботи полягає в розробці та обґрунтуванні вдосконаленої конструкції гідродинамічного кавітаційного апарата статичного типу на основі комплексного чисельного аналізу. Зокрема, у роботі запропоновано оптимізовану геометрію діафрагми, яка дозволяє досягти більш ефективного розподілу тиску та утворення кавітаційних зон, мінімізуючи при цьому ризик кавітаційної ерозії. Вперше проведено систематичний аналіз впливу діаметра діафрагми на характеристики потоку, що дало змогу визначити

оптимальні параметри для забезпечення високої продуктивності та надійності апарата.

Практична цінність роботи полягає у створенні рекомендацій щодо проектування гідродинамічних кавітаційних апаратів, які можна впроваджувати в реальних виробничих умовах. Оптимізована конструкція апарата сприяє підвищенню енергоефективності технологічних процесів, зниженню витрат на технічне обслуговування та збільшенню терміну експлуатації обладнання. Результати чисельного моделювання можуть бути використані для створення нових або вдосконалення існуючих кавітаційних апаратів, що відповідають вимогам сучасної промисловості.

Таким чином, актуальність теми роботи обумовлена необхідністю розробки інноваційних підходів до проектування гідродинамічних кавітаційних апаратів, які забезпечують їх ефективність, довговічність і енергоекономічність, а також важливістю впровадження сучасних методів чисельного моделювання для вирішення цих завдань.

1. Методи математичного моделювання кавітаційної техніки та технології

Кавітація є типовим процесом переходу паро-газової фази, який зазвичай виникає в дроселювальних структурах[1]. Коли локальний статичний тиск рідини стає нижчим за тиск насиченої пари при заданій температурі, крихітні газові зародки, що знаходяться у рідині або на межі розділу твердої і рідкої фаз, збільшуються через різницю внутрішнього і зовнішнього тиску. Згодом ці бульбашки колапсують, вивільняючи значну кількість енергії внаслідок відновлення тиску [2, 3, 4, 5]. На сьогодні кавітація має важливе значення у вирішенні проблем очищення стічних вод [6, 7]. Локальне середовище з високою температурою і високим тиском, яке утворюється під час колапсу кавітаційних бульбашок, сприяє піролізу молекул води поблизу їхньої поверхні, що призводить до утворення гідроксильних і водневих вільних радикалів. Ці радикали мають сильний окислювальний ефект і можуть розкласти органічні забруднювачі у водному середовищі завдяки дифузії гідроксильних радикалів у рідину [8].

Кавітаційні явища широко використовуються в різних галузях промисловості, включаючи обробку рідин, очищення, змішування та емульгування, а також у системах водопостачання та енергетики. Розуміння і керування кавітаційними явищами вимагає точного математичного моделювання для вивчення утворення, росту і колапсу кавітаційних бульбашок та їхнього впливу на рідини і конструкції обладнання. У цьому контексті використовується кілька основних методів математичного моделювання як для аналітичного, так і для чисельного аналізу.

Основою математичного моделювання кавітаційних процесів є використання гідродинамічних рівнянь. Найважливішими з них є рівняння Нав'є-Стокса, які описують рух рідини з урахуванням в'язкості, і рівняння Бернуллі, які пов'язують швидкість, тиск і висоту стовпа рідини в потоці. Ці рівняння

дозволяють визначити області низького тиску, які є необхідними умовами для виникнення кавітації. Крім того, рівняння нерозривності використовуються для забезпечення збереження маси рідини. Разом ці математичні інструменти дозволяють моделювати поведінку рідини в зоні кавітації та визначати її параметри.

Динаміка утворення і руйнування кавітаційної бульбашки описується рівнянням Релея-Плессета. Це рівняння визначає зміну радіуса бульбашки під впливом зміни тиску. Модифікації цього рівняння враховують такі фактори, як в'язкість рідини, поверхневий натяг, теплообмін і масообмін. Для більш точного опису процесу багатобульбашкової течії використовують багатофазні моделі, такі як моделі Ейлера-Лагранжа та Ейлера-Ейлера, які аналізують взаємодію між рідиною та бульбашками за різних умов.

Термодинамічні аспекти кавітації також відіграють важливу роль у математичному моделюванні. Утворення і руйнування бульбашок пов'язане з фазовим переходом між рідиною і газом, зміною температури і виділенням великої кількості енергії. Для моделювання цих процесів враховуються параметри випаровування і конденсації, а також розподіл температури всередині рідини і бульбашки. Такі моделі допомагають оцінити енергетичний вплив кавітаційного процесу на навколишнє середовище, включаючи ерозійні пошкодження матеріалів.

Чисельні методи є одним з основних інструментів математичного моделювання кавітаційної техніки. Вони дозволяють розв'язувати складні системи гідродинамічних і термодинамічних рівнянь в реальних умовах. Метод скінченних елементів широко використовується для аналізу напружень і деформацій в конструкціях, що піддаються кавітації. Метод скінченних об'ємів є стандартом для чисельного розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса, тоді як метод граничних елементів використовується для моделювання динаміки окремих бульбашок у рідині. Обчислювальна гідродинаміка відіграє важливу роль у цій галузі, дозволяючи моделювати течію рідини і кавітаційні процеси в складних

геометричних просторах. Для цього використовуються спеціалізовані програмні пакети, такі як ANSYS Fluent, SolidWorks Flow Simulation та інші.

Турбулентність є ще одним важливим аспектом кавітаційних явищ. Для моделювання турбулентності використовуються такі моделі, як k- ϵ , k- ω та LES (Large Eddy Simulation), що дозволяють описати турбулентну структуру та оцінити її вплив на розвиток кавітаційних бульбашок. Взаємодія між турбулентністю і кавітацією є важливим фактором у прогнозуванні стабільності та ефективності кавітаційної технології. Емпіричні моделі також часто використовуються для спрощеного аналізу. Ці моделі базуються на експериментальних даних і дозволяють швидко оцінити параметри кавітаційного процесу, такі як кавітаційне число, площа утворення бульбашок і швидкість ерозії. Напівемпіричні підходи поєднують емпіричні дані з чисельними методами для досягнення вищої точності.

Тому математичне моделювання кавітаційної техніки і технологій є універсальним і охоплює широкий спектр методів, від гідродинамічних рівнянь до чисельних методів та емпіричних моделей. Використання цих підходів не тільки покращує наше розуміння фізики кавітації, але й дозволяє створювати більш ефективні та надійні технологічні рішення в широкому спектрі галузей промисловості.

1.1. Методи, які застосовують для удосконалення проектування обладнання

Проектування кавітаційного обладнання є складним процесом, який вимагає комплексного підходу, що враховує фізичні, гідродинамічні та конструктивні особливості. Досягнення сучасних інженерних методів, чисельного моделювання та експериментальних методик дозволили значно вдосконалити процес розробки таких пристроїв. Основними цілями вдосконалення є підвищення ефективності роботи обладнання, зменшення енергетичних витрат, мінімізація ерозії та збільшення довговічності обладнання.

Одним з основних методів удосконалення є комп'ютерне моделювання гідродинаміки, яке дозволяє детально проаналізувати гідродинамічні процеси в робочій зоні кавітаційного обладнання, включаючи утворення і генерацію кавітаційних бульбашок, динаміку багатофазного потоку і розподіл тиску. Таке моделювання дає можливість оптимізувати геометрію пристрою на етапі проектування, а такі програмні інструменти, як ANSYS Fluent, SolidWorks Flow Simulation та інші, дозволяють тестувати різні варіанти конструкції, скорочуючи витрати на створення прототипів і випробування.

Оптимізація конструктивних параметрів обладнання є ще одним ключовим напрямком для вдосконалення. Зокрема, велика увага приділяється вдосконаленню оптимальної форми мішалки, діаметру робочого потоку, довжини і кута конуса. Наприклад, зменшення діаметра мішалки сприяє збільшенню швидкості рідини і поліпшенню кавітації, але при цьому необхідно контролювати перепад тиску, щоб уникнути несприятливих наслідків, таких як передчасна ерозія і нестабільність потоку. Крім геометричних параметрів, важливим є також матеріал, який використовується при виготовленні пристрою.

Вдосконалені матеріали дозволяють підвищити стійкість обладнання до ерозійного зносу, спричиненого руйнуванням кавітаційних бульбашок. Сучасні зносостійкі матеріали, такі як композити та спеціальні сплави, забезпечують тривалу роботу обладнання навіть у жорстких умовах експлуатації. Іншим методом є аналіз потоку за допомогою турбулентних моделей.

Важливим аспектом розробки дизайну є експериментальна перевірка моделі. Фізичні прототипи обладнання випробовуються в лабораторії для підтвердження точності чисельної моделі. Експериментальна установка дозволяє визначити ключові параметри роботи обладнання, такі як тиск, витрата, рівень кавітаційної сили та знос матеріалу. Дані, отримані під час експериментів, використовуються для коригування конструктивних параметрів і вдосконалення математичної моделі.

На основі результатів експериментів також активно використовуються емпіричні та напівемпіричні моделі для швидкої оцінки ефективності конструкції без складних розрахунків. Такі підходи часто використовуються для попереднього аналізу або коли ресурсні обмеження не дозволяють провести повномасштабне чисельне моделювання.

Ще одним перспективним напрямком є використання оптимізаційних алгоритмів. Це генетичні алгоритми, методи рою частинок або інші сучасні чисельні методи, які автоматично знаходять оптимальні параметри конструкції на основі певних критеріїв, таких як мінімізація енергетичних витрат або максимізація ефективності.

Тому вдосконалення конструкції кавітаційного обладнання ґрунтується на комплексному підході, що включає сучасні чисельні методи, алгоритми оптимізації, вибір матеріалів та експериментальну перевірку. Це дозволяє створювати високопродуктивне обладнання, яке відповідає вимогам сучасної промисловості та гарантує довговічність і стабільну роботу.

1.2. Методи, які використовуються у галузях промисловості

Кавітаційні методи знайшли широке застосування у багатьох галузях промисловості завдяки їхній здатності ефективно обробляти рідини, інтенсифікувати фізико-хімічні процеси та забезпечувати нові технологічні можливості. Кавітація — це явище утворення, росту й колапсу бульбашок у рідині, викликане локальним зниженням тиску. Енергія, що виділяється під час руйнування бульбашок, створює потужні ударні хвилі, які можуть використовуватися для різноманітних технологічних процесів. Кавітаційні методи поділяються на гідродинамічні, ультразвукові та акустичні, кожен з яких має свої особливості й застосування в промисловості.

1. Харчова промисловість.

У харчовій галузі кавітаційні методи активно використовуються для гомогенізації рідин, створення емульсій, екстракції біологічно активних речовин і стерилізації продуктів. Гідродинамічна кавітація дозволяє рівномірно перемішувати рідкі компоненти, що забезпечує отримання стабільних емульсій, наприклад, у виробництві молочних продуктів, соусів, напоїв та олій. Кавітаційні методи також використовуються для екстракції корисних речовин з рослинної сировини, що дозволяє підвищити вихід цінних компонентів і зменшити використання розчинників. Завдяки можливості руйнування мікробних клітин кавітація застосовується для пастеризації рідких продуктів, забезпечуючи їх знезараження без термічного впливу.

2. Хімічна промисловість.

У хімічній галузі кавітаційні методи використовуються для інтенсифікації процесів змішування, диспергування, хімічного синтезу та реакцій. Зокрема, кавітація дозволяє прискорити процеси емульгування та диспергування твердих частинок у рідині, що є важливим для виробництва фарб, лаків, мастил і полімерних матеріалів. Завдяки локальному підвищенню температури та тиску під час колапсу бульбашок кавітація забезпечує активацію хімічних реакцій, включаючи синтез наноматеріалів і прискорення каталітичних процесів.

Кавітаційна обробка також використовується для утилізації відходів і очищення стічних вод у хімічному виробництві.

3. Енергетика та паливна промисловість.

У сфері енергетики кавітаційні методи застосовуються для підвищення ефективності паливопідготовки, зокрема для змішування та емульгування палива з водою, що дозволяє зменшити витрати палива й шкідливі викиди. Гідродинамічна кавітація використовується для обробки нафтопродуктів з метою підвищення їх якості, руйнування важких фракцій та зменшення в'язкості. Кавітаційні установки також використовуються для очищення трубопроводів і теплообмінників від відкладень і накипу завдяки інтенсивним ударним хвилям, які ефективно руйнують тверді забруднення.

4. Машинобудування та металообробка.

У машинобудуванні кавітаційні методи застосовуються для очищення деталей, підвищення якості поверхонь і обробки матеріалів. Кавітаційне очищення забезпечує видалення бруду, мастильних матеріалів і оксидних плівок з поверхонь деталей, що особливо важливо у точному приладобудуванні. Ультразвукова кавітація використовується для обробки поверхонь металевих виробів, надаючи їм необхідну шорсткість або покращуючи адгезію покриттів. Також кавітація застосовується для поверхневого зміцнення матеріалів, що підвищує їхню зносостійкість та довговічність.

5. Очищення води та екологічні технології.

Кавітаційні методи широко застосовуються для очищення стічних вод і знезараження питної води. Гідродинамічна та ультразвукова кавітація дозволяють ефективно руйнувати органічні забруднення, мікроорганізми та токсичні речовини у воді. За рахунок інтенсивного перемішування та локальних високих температур відбувається окислення шкідливих речовин, а також руйнування стійких сполук, таких як нафтопродукти або пестициди. Кавітація також використовується для очищення резервуарів, каналів та обладнання від біоплівки і твердих відкладень.

6. Фармацевтична та косметична промисловість.

У фармацевтичній галузі кавітаційні методи застосовуються для створення однорідних емульсій, дисперсій та наночастинок, що використовуються у виробництві ліків, мазей і кремів. Ультразвукова кавітація сприяє отриманню дрібнодисперсних суспензій, які забезпечують кращу біодоступність активних речовин. У косметичній промисловості кавітація використовується для виробництва кремів, лосьйонів та інших засобів догляду з високою стабільністю й однорідністю структури.

Таким чином, кавітаційні методи є універсальним інструментом, що охоплює широкий спектр застосувань у промисловості. Вони дозволяють інтенсифікувати технологічні процеси, підвищити ефективність виробництва, знизити витрати енергії та ресурсів, а також забезпечити екологічно чисті технології. Завдяки розвитку сучасних технологій і обладнання, кавітаційні методи продовжують удосконалюватися й набувати нових можливостей у промисловому застосуванні.

1.2.1. Статистичні моделі гідродинамічного кавітаційного апарату статичного типу

Статистичні моделі для гідродинамічного кавітаційного апарату статичного типу використовуються для опису процесів, що мають випадковий або нерегулярний характер. Оскільки кавітація в апараті може бути нестабільною і залежить від багатьох факторів, статистичні підходи дозволяють аналізувати середні характеристики, а також коливання параметрів, пов'язаних з утворенням і руйнуванням бульбашок, розподіл тиску та швидкості рідини. Ось основні статистичні методи та моделі, які застосовуються для опису такого типу апаратів:

1. Модель розподілу розмірів кавітаційних бульбашок

- У зоні кавітації розміри бульбашок можуть бути різними, залежно від характеристик потоку і тиску. Використання статистичних розподілів дозволяє моделювати розміри бульбашок у певному об'ємі рідини.

- Найчастіше застосовують нормальний, логнормальний або експоненційний розподіл для опису діаметра бульбашок, що утворюються в кавітаційній зоні.

- Аналіз розподілу розмірів дає змогу оцінити середній діаметр бульбашок і ймовірність утворення бульбашок певного розміру.

2. Статистична модель утворення і колапсу бульбашок

- Ця модель базується на ймовірностях утворення, росту та колапсу бульбашок. Оскільки процеси утворення кавітаційних бульбашок мають випадковий характер, вони описуються ймовірнісними функціями.

- Наприклад, можна використовувати функцію розподілу ймовірностей для визначення частоти колапсу бульбашок у певній зоні або ймовірності появи нових бульбашок.

- Така модель дозволяє оцінити середню частоту кавітаційних явищ та їхній вплив на стінки апарату (ерозію).

3. Метод Монте-Карло для моделювання кавітаційних процесів

- Метод Монте-Карло широко використовується для моделювання кавітаційних явищ у складних системах, де присутня значна кількість випадкових змінних.

- За допомогою численних симуляцій із випадковими значеннями вхідних параметрів (тиск, швидкість потоку, температура) можна оцінити ймовірнісні характеристики кавітаційних процесів.

- Цей метод застосовується для визначення ймовірностей різних сценаріїв, наприклад, утворення та руйнації бульбашок при певних параметрах потоку.

4. Модель кавітаційного шуму

- Утворення та колапс кавітаційних бульбашок супроводжуються шумовими ефектами, які можна описати статистично. Розподіл інтенсивності шуму дозволяє оцінити інтенсивність кавітаційного процесу.

- Аналіз статистичних характеристик шуму, таких як середня інтенсивність та варіативність, дозволяє оцінити рівень кавітації в апараті, що може бути корисним для його контролю та оптимізації.

5. Модель середньої швидкості росту бульбашок

- Ця модель використовує статистичні методи для визначення середньої швидкості росту кавітаційних бульбашок, враховуючи змінність тиску та температури.

- Застосування регресійного аналізу або оцінок середніх значень дозволяє спрогнозувати середній час існування бульбашок до моменту їхнього колапсу.

6. Ймовірнісний аналіз тискових флуктуацій

- Розподіл тиску в апараті може бути нерівномірним, і ці флуктуації можуть істотно впливати на утворення кавітації. Статистичний аналіз тискових флуктуацій дозволяє оцінити ймовірність виникнення умов для кавітації в певних зонах апарату.

- Визначення статистичних параметрів (середнього значення, дисперсії) тискових коливань дозволяє прогнозувати появу кавітаційних зон при певних умовах потоку.

7. Статистичний аналіз ерозійних пошкоджень

- Колапс кавітаційних бульбашок спричиняє мікроудару на поверхнях апарату, що може призводити до ерозії. Статистична модель розподілу ерозійних пошкоджень допомагає оцінити середню швидкість зносу та ймовірність утворення ерозійних пошкоджень на різних ділянках.

- Моделі розподілу ерозії базуються на аналізі місцевих умов тиску, частоти колапсу бульбашок і механічної міцності матеріалу, що дозволяє прогнозувати термін служби обладнання.

Переваги статистичних моделей

- Дозволяють оцінювати середні параметри кавітаційного процесу, навіть якщо сам процес має складний або нерегулярний характер.

- Дають змогу враховувати коливання параметрів, що знижує ризик похибок у розрахунках і забезпечує надійніші прогнози.

- Підходять для аналізу великих обсягів даних або даних з випадковим розподілом параметрів, що полегшує оптимізацію конструкції.

Статистичні моделі допомагають інженерам точніше оцінити ефективність гідродинамічного кавітаційного апарату та продовжити термін його експлуатації завдяки оптимізації процесів у зоні кавітації.

1.2.2. Регресійні моделі гідродинамічного кавітаційного апарату статичного типу

Регресійні моделі для гідродинамічного кавітаційного апарату статичного типу використовуються для аналізу взаємозв'язків між різними параметрами кавітаційного процесу та для прогнозування поведінки системи на основі статистично обґрунтованих залежностей. Такі моделі можуть допомогти оцінити вплив змін у конструктивних або експлуатаційних параметрах апарату на ефективність та інтенсивність кавітації. Нижче наведені основні регресійні моделі та методи, які застосовуються для опису гідродинамічних кавітаційних апаратів.

1. Лінійна регресія

- Лінійні регресійні моделі описують залежність між основними параметрами, такими як тиск, швидкість потоку, розмір бульбашок і швидкість утворення кавітаційних бульбашок. Лінійна регресія є особливо корисною, коли залежність між змінними близька до лінійної.

- Наприклад, лінійну регресію можна застосувати для прогнозування середнього діаметра кавітаційних бульбашок залежно від швидкості потоку або тиску в зоні кавітації.

- Такі моделі забезпечують простоту інтерпретації, однак вони підходять лише для випадків, де зв'язок між змінними є лінійним.

2. Множинна регресія

- Множинна регресія дозволяє врахувати вплив декількох незалежних змінних одночасно. Цей метод корисний у моделях кавітації, де на утворення бульбашок впливають декілька параметрів: швидкість потоку, тиск, температура, фізичні властивості рідини тощо.

- Модель множинної регресії допомагає оцінити вплив кожного з цих факторів окремо і в сукупності, а також спрогнозувати їхній комбінований вплив на такі вихідні параметри, як інтенсивність кавітації чи середній об'єм бульбашок.

- Вона може бути корисною для конструювання більш досконалих апаратів, оптимізуючи кожен параметр окремо для досягнення бажаних результатів.

3. Нелінійна регресія

- Кавітаційні процеси часто мають нелінійний характер, що вимагає застосування нелінійних регресійних моделей. Наприклад, залежність між тиском і швидкістю утворення бульбашок може мати експоненційний або степеневий характер.

- Нелінійні регресійні моделі дозволяють краще описати ці взаємозв'язки, наприклад, для визначення розмірів бульбашок залежно від зміни температури і тиску в системі.

- Такі моделі можуть бути складнішими для реалізації, але вони більш точно відображають реальні процеси, що відбуваються в зоні кавітації.

4. Логістична регресія

- Логістична регресія може використовуватися для бінарної класифікації станів, наприклад, для визначення, чи виникне кавітація при певних умовах потоку. Логістична модель може бути корисною для розробки алгоритмів контролю, які передбачатимуть наявність або відсутність кавітаційного ефекту.

- Ця модель застосовується в ситуаціях, коли важливо передбачити певні порогові значення параметрів, при яких починається утворення бульбашок або колапс існуючих бульбашок.

5. Поліноміальна регресія

- Поліноміальна регресія використовується для моделювання більш складних залежностей між параметрами. У випадках, коли лінійна модель не підходить, але зв'язок між змінними має вигляд полінома, поліноміальна регресія може надати точніші результати.

- Наприклад, для опису залежності швидкості росту бульбашок від зміни тиску можна застосувати поліноміальну регресійну модель другого чи третього ступеня.

- Вона дозволяє моделювати як зростання, так і спадання певних параметрів залежно від зміни умов в апараті, що корисно для аналізу оптимальних режимів роботи.

6. Регресійний аналіз часових рядів

- У випадку, коли необхідно аналізувати динамічні зміни параметрів кавітаційного апарату, можна використовувати регресійні моделі часових рядів. Такі моделі враховують часову залежність зміни характеристик потоку, тиску та інтенсивності кавітаційних процесів.

- Регресійні часові моделі корисні для оцінки змін у часі та передбачення подальших змін у системі, що дозволяє контролювати процес і запобігати надмірній кавітації.

- Ці моделі можуть використовуватися для прогнозування й оптимізації режимів роботи, а також для запобігання поломкам та ерозії обладнання.

7. Кусково-лінійна регресія

- У деяких випадках залежність між змінними може мати різний характер у різних діапазонах значень. Кусково-лінійна регресія дозволяє моделювати систему, розділивши її на частини з різними характеристиками (наприклад, різні режими роботи апарату).

- Цей метод застосовується для кавітаційних апаратів, де змінні мають нелінійний характер, але можуть бути розділені на діапазони, які описуються окремими лінійними моделями. Наприклад, один режим може описувати стан без кавітації, а інший — активну фазу утворення бульбашок.

- Кусково-лінійна регресія дозволяє моделювати поведінку апарату при переході від однієї фази до іншої.

Переваги регресійних моделей

- Простота реалізації та інтерпретації: Регресійні моделі часто є інтуїтивними і зрозумілими, їх легко інтерпретувати.

- Прогнозування: Моделі дозволяють прогнозувати параметри системи на основі вхідних даних, що є корисним для контролю процесу.

- Аналіз впливу параметрів: Регресія дає можливість оцінити, які фактори мають найбільший вплив на кавітацію, що дозволяє оптимізувати конструкцію апарату.

Недоліки регресійних моделей

- Чутливість до точності вхідних даних: Неточності або випадкові коливання в даних можуть значно вплинути на результати.

- Обмеженість у випадках складної динаміки: Регресійні моделі можуть не забезпечувати високої точності для систем з нелінійними або турбулентними процесами.

Регресійні моделі є важливим інструментом для дослідження і оптимізації гідродинамічних кавітаційних апаратів, забезпечуючи інженерів ефективними методами для аналізу та прогнозування роботи таких систем.

1.3. Мета та завдання роботи

Метою роботи було удосконалення конструкції гідродинамічного кавітаційного апарату статичного типу шляхом чисельного моделювання з використанням програмного забезпечення SolidWorks. Це дозволить розробити ефективну конструкцію апарату, яка забезпечує стабільний процес кавітації з мінімальним впливом на конструкційні елементи та підвищенням надійності й продуктивності апарату.

Завдання:

Аналізуючи літературу та існуючі конструкції гідродинамічних кавітаційних апаратів статичного типу, їхні характеристики, основні принципи роботи та особливості функціонування. Визначити фактори, що впливають на процес кавітації та ефективність апарату.

Формулювання основних вимог до конструкції. Визначити вимоги до гідродинамічного кавітаційного апарату, зокрема щодо геометрії, матеріалів, робочих параметрів та умов експлуатації. Врахувати вимоги для забезпечення стабільності кавітаційного процесу та зниження ризиків кавітаційної ерозії.

Розробка та побудова 3D-моделі апарату. За допомогою програмного забезпечення SolidWorks створити тривимірну модель гідродинамічного кавітаційного апарату з урахуванням усіх конструкційних особливостей, зокрема конфігурації звуження, місць входу та виходу рідини.

Визначення умов моделювання та чисельного розрахунку. Налаштувати в SolidWorks Flow Simulation фізичні параметри потоку, граничні умови та інші змінні, що імітують реальні робочі умови. Обрати підходящу модель турбулентності та інші необхідні параметри для адекватного відображення кавітаційного процесу.

Проведення чисельного моделювання та аналіз результатів. Виконати чисельне моделювання роботи апарату в SolidWorks для оцінки розподілу тиску, швидкості потоку, температури та зони утворення кавітаційних бульбашок. Аналізувати результати для виявлення критичних зон та недоліків конструкції.

Оптимізація конструкції на основі результатів моделювання. Внести зміни у конструкцію апарату для підвищення його продуктивності та зниження негативного впливу кавітації. Оптимізувати геометрію звуження та положення кавітаційних зон для ефективного розподілу навантажень.

Оцінка ефективності запропонованої конструкції. Провести повторне моделювання для оцінки покращень та перевірити ефективність оновленої конструкції у порівнянні з початковим варіантом. Проаналізувати зміни в продуктивності апарату та зниження ризиків кавітаційної ерозії.

Висновки та рекомендації. На основі виконаного проекту зробити висновки про доцільність удосконалень та надати рекомендації щодо подальшого вдосконалення конструкції і можливостей практичного використання результатів моделювання. Проект дозволяє наблизитися до розробки ефективного гідродинамічного кавітаційного апарату статичного типу, що забезпечить стабільність кавітаційних процесів, підвищення продуктивності та довговічність конструкції.

2. Розроблення 3-D моделі гідродинамічного кавітаційного апарату статичного типу

2.1. Розроблення математичної моделі об'єкта

Для побудови математичної моделі гідродинамічного кавітаційного апарату статичного типу було створено 3D-модель досліджуваного об'єкта, яка дозволяє детально відобразити його геометрію, конструкційні особливості та зони, в яких очікується виникнення кавітаційних процесів. Ця модель у SolidWorks надає можливість точно відтворити фізичні умови, що діють на рідину в апараті, а також задати параметри потоку, які відповідають реальним експлуатаційним умовам.

Створена 3D-модель є основою для подальшого чисельного моделювання, яке проводиться за допомогою модулів SolidWorks Flow Simulation або аналогічного ПЗ, що підтримує розрахунок рідинного потоку з утворенням кавітації. Налаштування моделі включає параметри граничних умов для потоку на вході та виході, параметри тиску та швидкості рідини, а також вибір моделей турбулентності та кавітації. Така підготовка дозволяє отримати точні дані щодо розподілу тиску, швидкостей та областей парової фази всередині апарату.

Математична модель на основі 3D-моделі дозволяє обчислити основні параметри гідродинамічного потоку, зокрема визначити місця, де утворюються кавітаційні бульбашки, та спрогнозувати їхній вплив на стінки апарату. Це дозволяє не лише оцінити ефективність поточної конструкції, але й провести оптимізацію геометрії апарату для мінімізації негативного впливу кавітаційної ерозії та покращення його продуктивності.

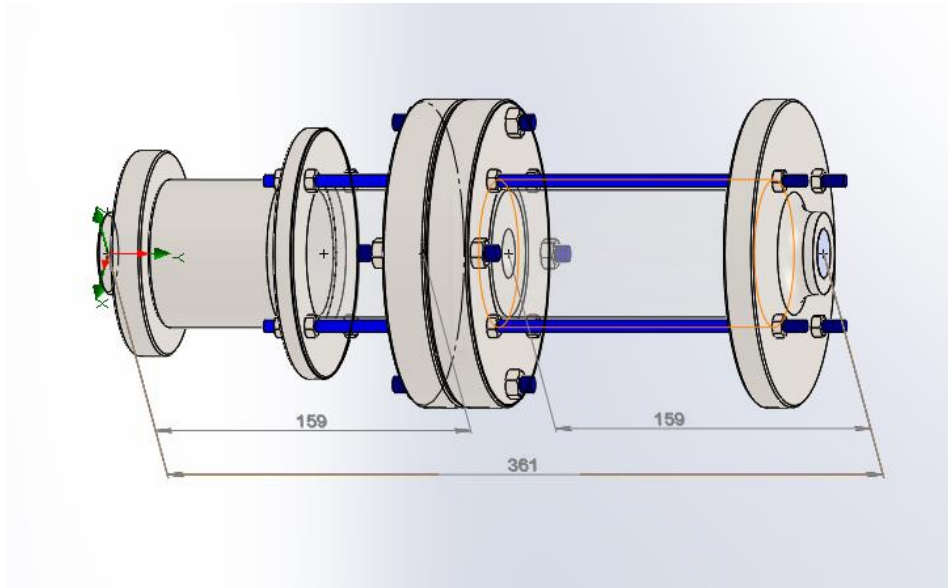


Рис.2.1(а) - Зображення 3Д-моделі гідродинамічного кавітаційного апарату статичного типу.

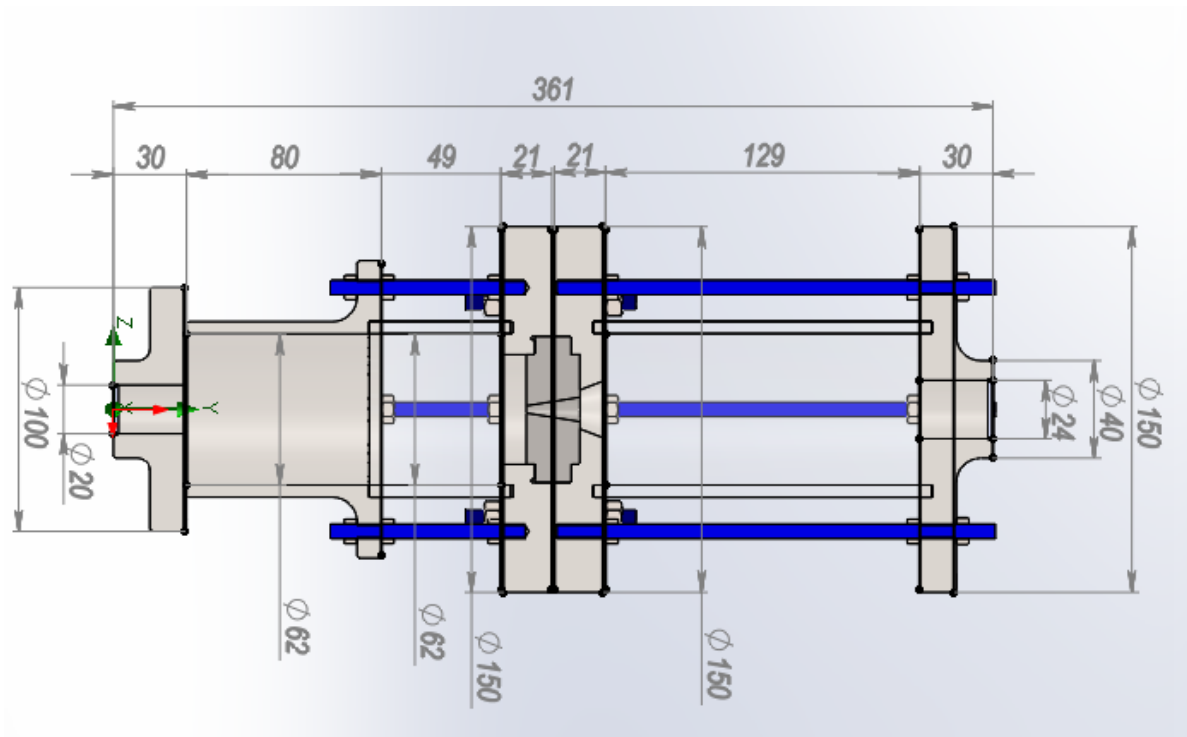


Рис.2.1(б) - Зображення 3Д-моделі гідродинамічного кавітаційного апарату статичного типу в розрізі.

На рисунку 2.1(а,б) представлена 3D-модель гідродинамічного кавітаційного апарату статичного типу, що показує основні компоненти його конструкції. Апарат складається з кількох основних частин. Верхня та нижня

кришки — закріплені фланцями, служать для забезпечення герметичності апарату та введення потоку рідини. У центрі кришки є отвір, для з'єднання з трубопроводом або вимірювальним обладнанням. Циліндрична камера — основна частина апарату, де відбувається процес кавітації. Ця прозора або сітчаста частина дає можливість спостерігати або контролювати потік рідини всередині. Фланці з'єднання — по обидва боки від камери знаходяться фланці, які з'єднують циліндричну камеру з верхньою та нижньою частинами апарату. Звуження в центральній частині (діафрагма) — знаходиться всередині центрального вузла. Це звуження сприяє прискоренню потоку рідини та створенню умов для кавітації. Воно знижує тиск у рідині при її проходженні через звужену частину, що викликає утворення кавітаційних бульбашок. Вхідний патрубок — ширша циліндрична частина внизу, яка слугує для входу обробленої рідини. Вона також має фланець для з'єднання з іншими елементами трубопроводу або з системою.

Ця конструкція дозволяє рідині проходити через центральну камеру, де, під дією тиску і геометрії апарату, відбувається утворення кавітаційних бульбашок.

2.2. Побудова 3D-моделі гідродинамічного кавітаційного апарату

статичного типу

Курсова робота передбачає розробку 3D-моделі гідродинамічного кавітаційного апарату статичного типу, який використовується для генерування кавітації в рідких середовищах. Моделювання базується на чисельних методах, таких як гідродинаміка та теорія потоків, з використанням спеціалізованої програми для створення 3D-моделей, SolidWorks. У моделі враховуються важливі параметри, такі як геометрія апарату, діаметри трубопроводів, діафрагм та вихідних елементів, а також режим роботи, що впливає на швидкість потоку, тиск і температуру.

Результатом проекту є створення віртуальної 3D-моделі, яка служитиме основою для подальшого аналізу та оптимізації гідродинамічних процесів у кавітаційному апараті, а також допоможе в розробці нових рішень для промислових застосувань.

Для побудови нової деталі в панельці «**File**» та вибираємо іконку «**New**» або комбінацією клавіш «**Ctrl+N**», як показано на Рис.2.1.1(а), після цих дій з'являється вікно вибору «**New SolidWorks Document**», як показано на Рис 2.1.1(б), вибираємо іконку «**Part**», натискаємо іконку «**OK**», після чого відкидається робоча зона побудови нової деталі в середовищі SolidWorks, як показано на рис 2.1.1(в). Для того щоб почати побудову ескіза, потрібно вибрати робочу поверхню, для зручності вибираємо «**Front Plane**» натискаючи праву кнопку миші, та вибираємо іконку «**Sketch**», після цього можна будувати нову деталь, за допомогою допоміжної панелі «**Sketch**».

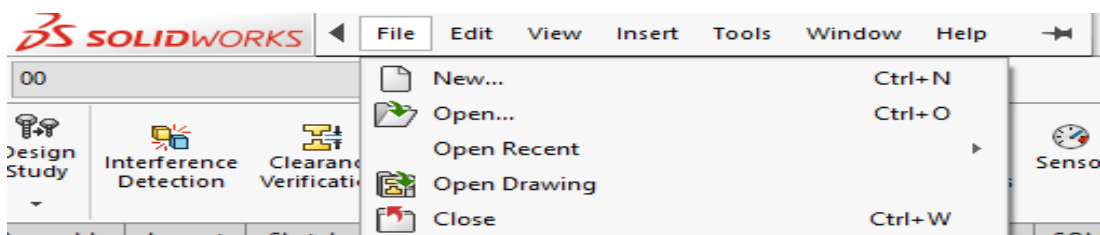


Рис. 2.1.1(а)

Створення нової деталі в робочій програмі SolidWorks

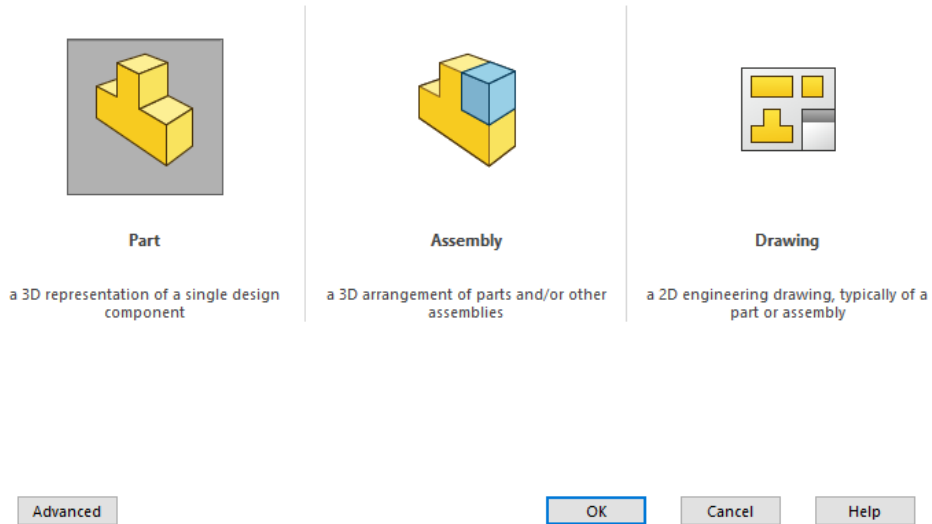


Рис 2.1.1(б)

Створення нової деталі в робочій програмі SolidWorks(продовження)

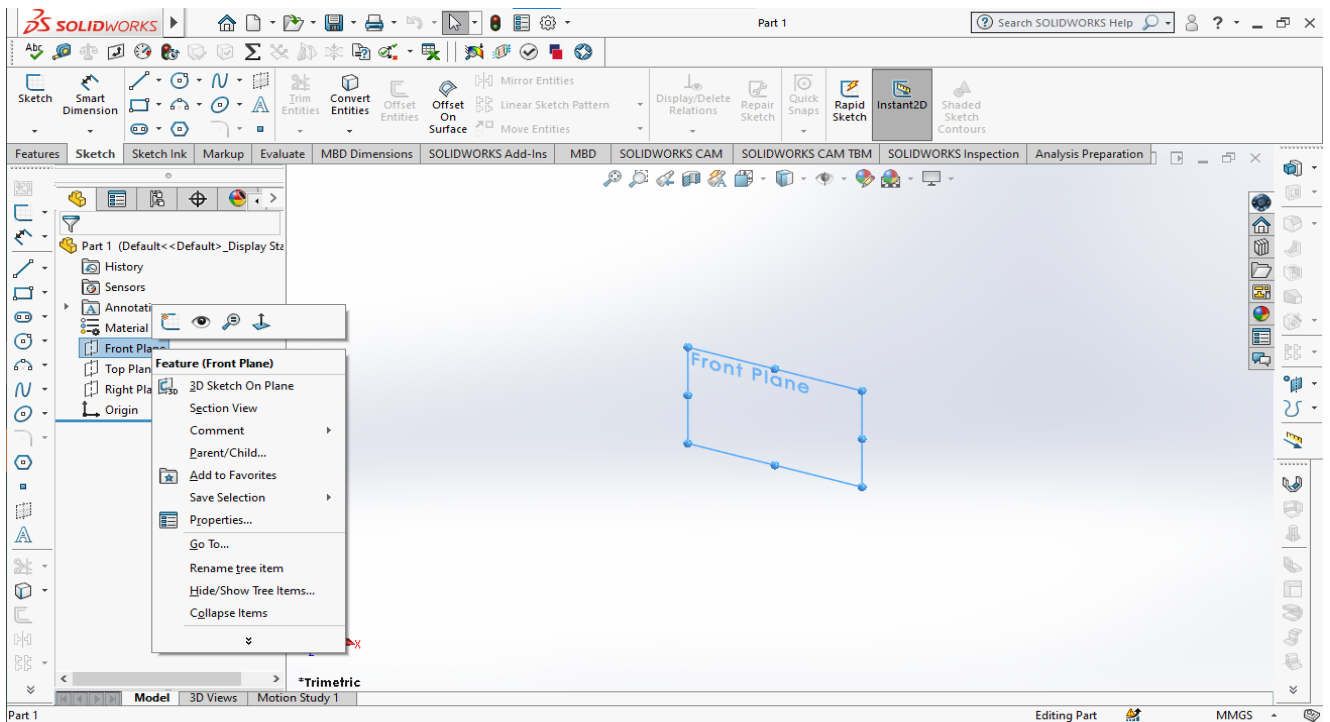


Рис 2.1.1(в)

Створення нової деталі в робочій програмі SolidWorks(продовження)

Отже, для початку спроектуємо 3Д-модель діафрагми. Діафрагма — це елемент трубопровідної системи, призначений для зменшення швидкості потоку рідини або газу, що проходить через нього, і збільшення тиску в цій частині системи. Діафрагма має форму розширюваної труби або каналу, в якому поперечний переріз поступово збільшується в напрямку потоку.

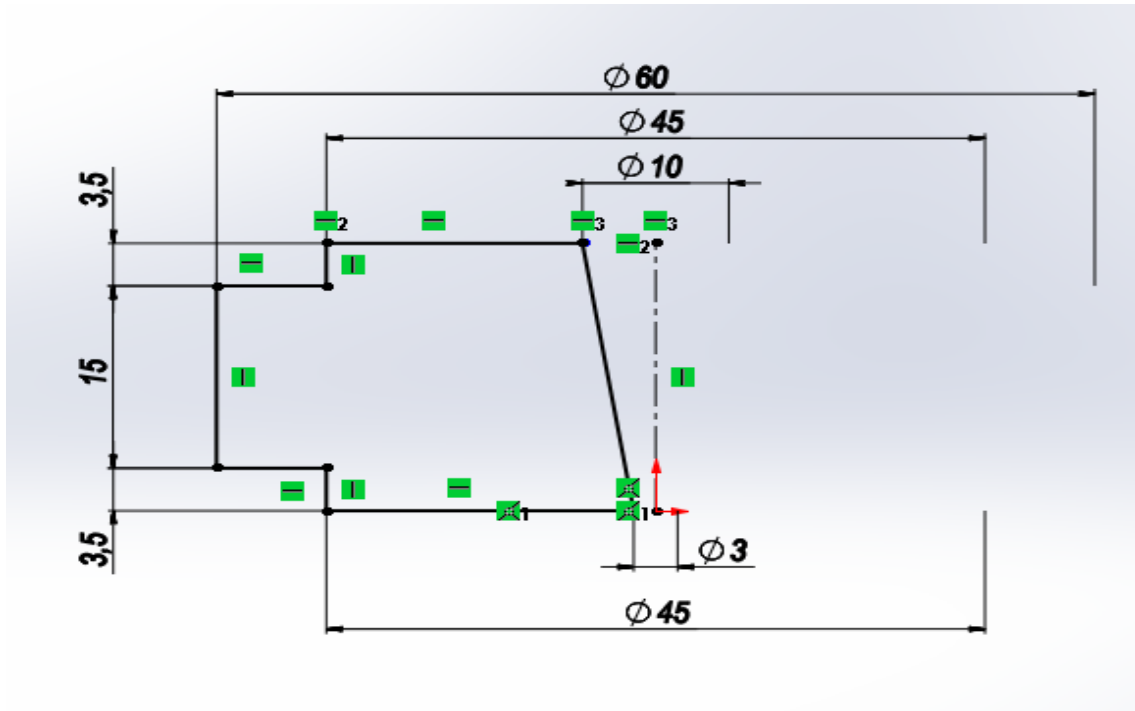


Рис. 2.1.2(а)

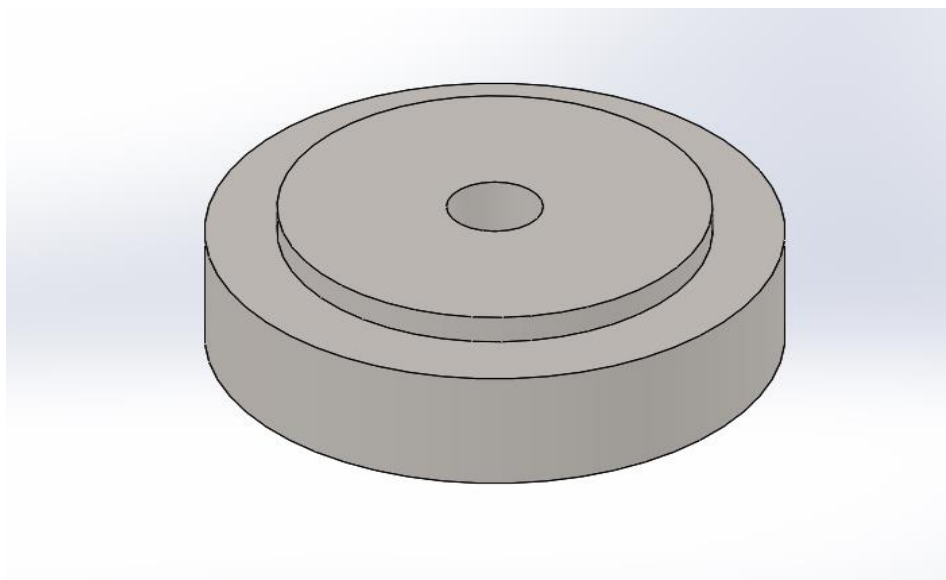


Рис 2.1.2(б)

Побудова діафрагми.

На рисунку 2.1.2(а) зображено ескіз діафрагми, в якому зазначаються вісь обертання, габаритні розміри та діаметри отворів. На рисунку 2.1.2(б) показано тіло, яке створенен за допомогою команди команди «**Revolve**» будуємо тіло обертання навколо осі. Також вибираємо матеріал з бази для діафрагми - «**Plain Carbon Steel**». Під кінець зберігаємо файл у робочій папці(теці) командою «**Save**» або комбінацією клавіш «**Ctrl+S**».

Аналогічно будуємо і решту деталей, створюючи кожен компонент конструкції гідродинамічного кавітаційного апарату статичного типу як окрему 3D-модель у CAD-програмі. Для кожної деталі визначаємо основні геометричні параметри, форму та функціональні елементи, щоб забезпечити її точне поєднання з іншими частинами апарату. Далі на рисунках 2.1.3-2.1.8 показано ілюстрації деталей в ізонометрії, назви та матеріал який було вибрано з базиданних SolidWorks.

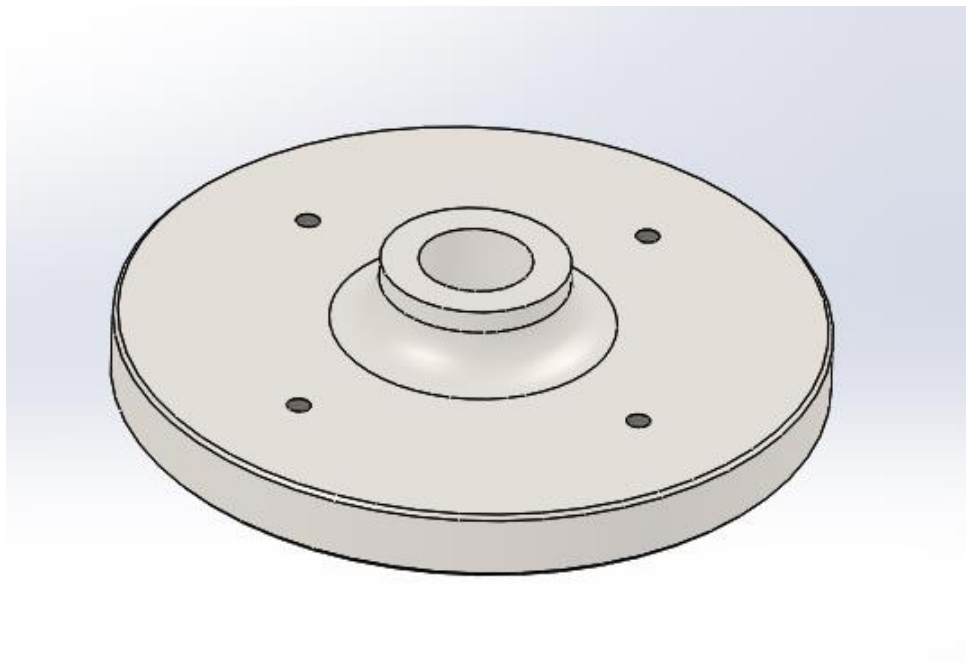


Рис. 2.1.3 - Верхня кришка – матеріал «**Plain Carbon Steel**»

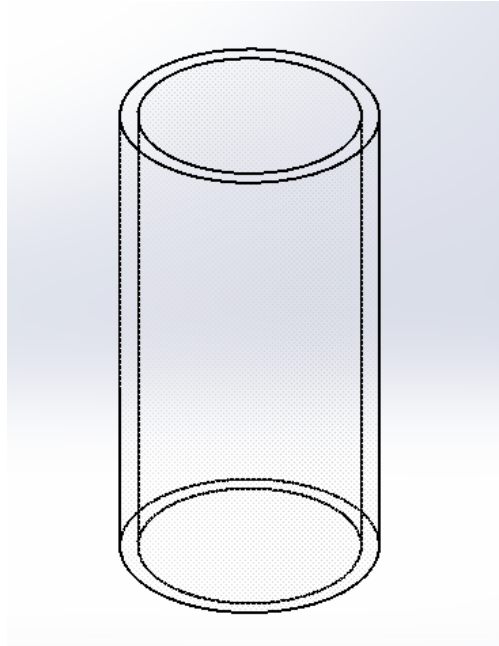


Рис. 2.1.4 – Верхня циліндрична камера – матеріал «**Glass**»

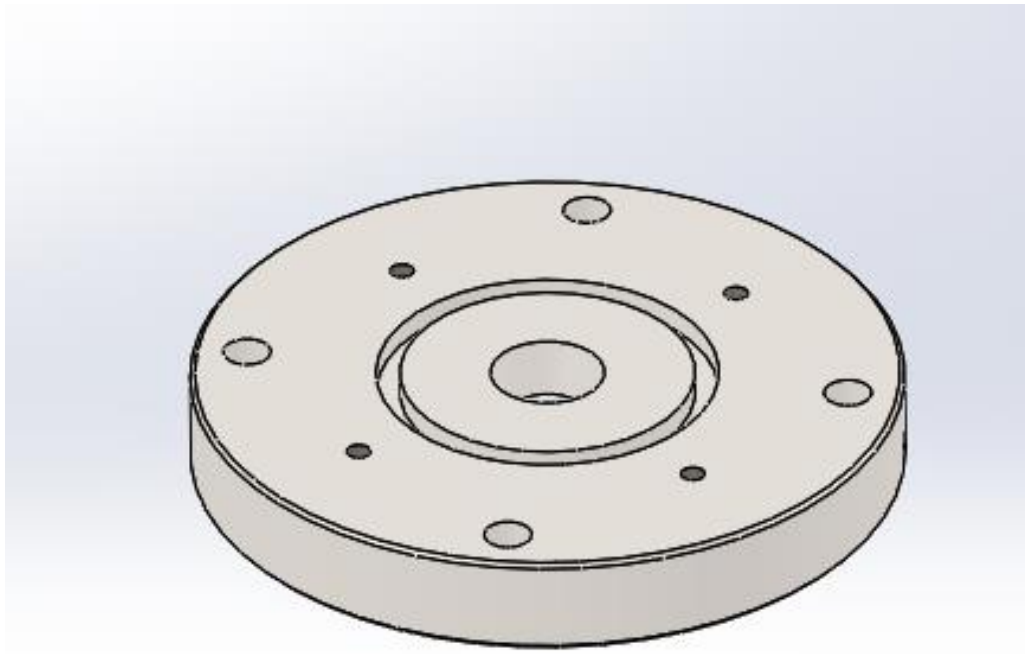


Рис. 2.1.5 – Фланець – матеріал «**Plain Carbon Steel**»

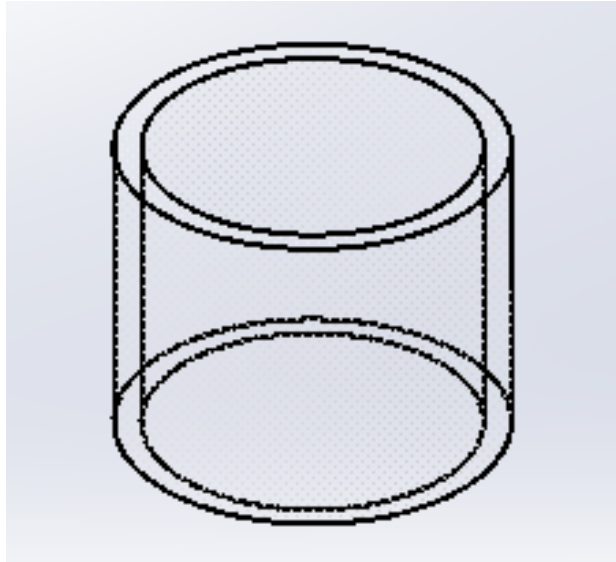


Рис. 2.1.6 – Нижня циліндрична камера – матеріал «**Glass**»

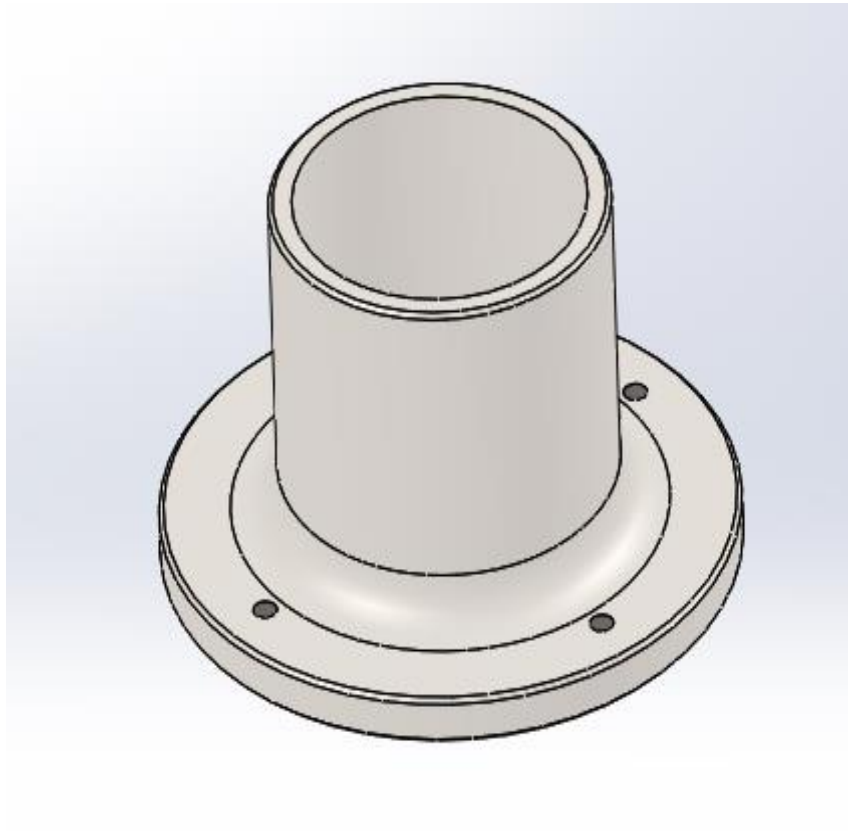


Рис 2.1.7 - Вхідний патрубок - матеріал «**Plain Carbon Steel**»

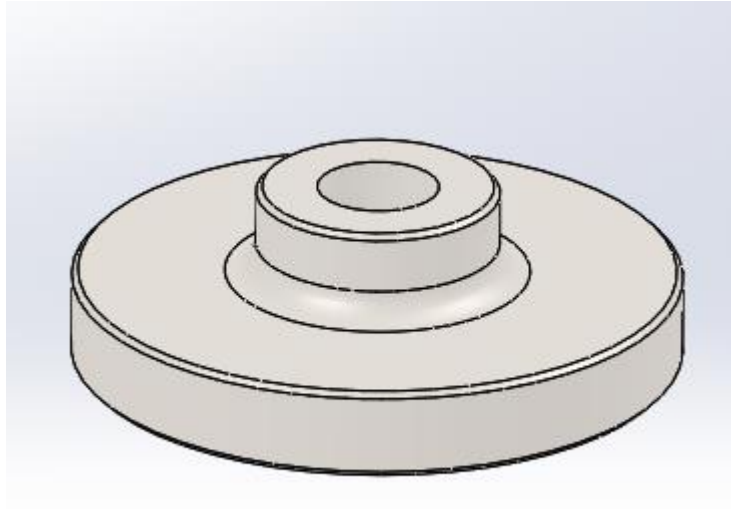


Рис. 2.1.8 - Нижня кришка – матеріал «**Plain Carbon Steel**»

Після побудови всіх деталей наступним кроком є створення збірної моделі, з якою далі будемо працювати. Це важливий етап, оскільки він дозволяє перевірити, як різні компоненти апарату взаємодіють між собою та чи правильно виконана геометрія на всіх етапах. Для того щоб її відкрити повторюємо все що показано на рисунку 2.1.1(а,б) та вибираємо іконку «**Assembly**». Відкриваємо робочу папку(теку) та закидуємо готові деталі у проект, та складаємо по ескізу готову модель, як зображено на рисунку 2.1(а,б).

3.Результати чисельних розрахунків

Для проведення розрахунків спершу задамо початкові дані, на основі яких будуть виконуватись чисельні моделювання і подальші оптимізаційні розрахунки. Ці дані є критичними для коректного визначення характеристик роботи гідродинамічного кавітаційного апарату.

Ось початкові параметри для гідродинамічного кавітаційного апарату стандартного типу:

1. Вихідний тиск: 3,5 атмосфери

Переведемо тиск із атмосфер у мегапаскалі.

1 атмосфера $\approx 0,1013$ МПа, тому:

$$3,5 \times 0,1013 = 0,35455 \text{ МПа.}$$

Вихідний тиск: 354550 Па.

2. Температура навколишнього середовища: 20 °С.

3. Кількість рідини на виході: 18,27 л/хв

Переведемо витрату з літрів за хвилину в метри кубічні за секунду:

$$18,27 \text{ л/хв} = 18,27 / (1000 \times 60) = 0,0003045 \text{ м}^3/\text{с.}$$

Кількість рідини на виході: 0,0003045 м³/с.

4. Діаметр вхідного патрубка: 20 мм; діаметр вихідного патрубка: 24 мм; діаметр діафрагми на вході: 3 мм; діаметр діафрагми на виході: 10 мм; загальна довжина апарату: 361 мм; відстань від початку входу рідини до діафрагми: 167 мм; відстань від діафрагми до кінця виходу рідини 167 мм.

Як наведено на Рис.2.1(а,б).

Переведемо міліметри в метри.

Діаметр вхідного патрубка: 0.02 м; діаметр вихідного патрубка: 0.024 м; діаметр діафрагми на вході: 0.003 м; діаметр діафрагми на виході: 0.01 м; загальна довжина апарату: 0,361 м; відстань від початку входу рідини до діафрагми: 0,167м; відстань від діафрагми до кінця виходу рідини 0,167м.

Після отримання початкових параметрів можна починати дослідження конструкції гідродинамічного кавітаційного апарату статичного типу, за допомогою програмного забезпечення **SolidWorks Flow Simulation**.

3.1. Розроблення алгоритму побудови симуляції потоку рідини у конструкції гідродинамічного кавітаційного апарату статичного типу

Для розроблення алгоритму побудови симуляції потоку рідини у конструкції гідродинамічного кавітаційного апарату статичного типу слід провести декілька основних етапів. Алгоритм має включати підготовку 3D-моделі, налаштування фізичних параметрів, проведення чисельного моделювання та аналіз результатів.

Щоб почати побудову симуляції слід використати майстра потоку для спрощення налаштування симуляції. Заходимо в допоміжну панель «**Flow Simulation**», та вибираємо іконку «**Wizard**», як показано на рисунку 3.1.1.

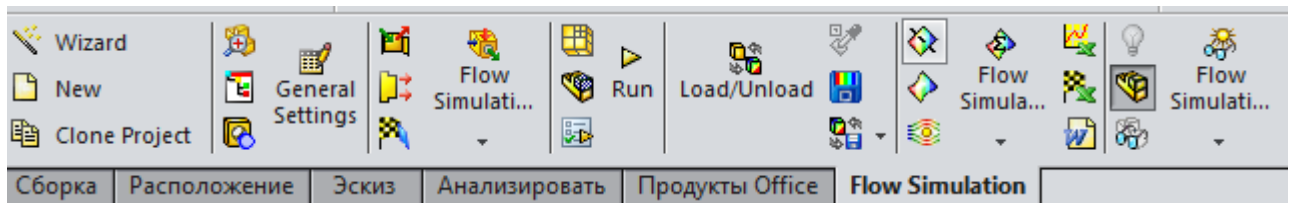


Рис. 3.1.1 – відкриття налаштування о’бєкта симуляції (всі комбінації, що будуть потрібні)

Після того, як виконали попередню дію вискочить вікно «**Wizard – Project Name**», яке зображено на рисунку 3.1.2., вибираємо команду «**Next**».

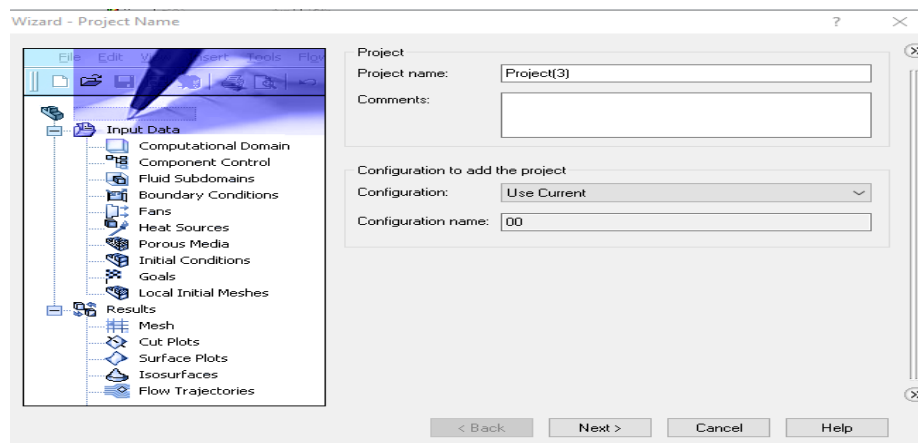


Рис. 3.1.2 – вікно «**Wizard – Project Name**»

Наступне вікно «**Wizard – Unit System**», дає змогу вибрати в якій системі одиниць будемо працювали, вибираємо міжнароду систему одиниць **SI**, та замінюємо температуру з Кельвінів у Збоверхн Цельсія, для зручності, як показано на рисунку 3.1.3., для продовження натискаємо команду «**Next**».

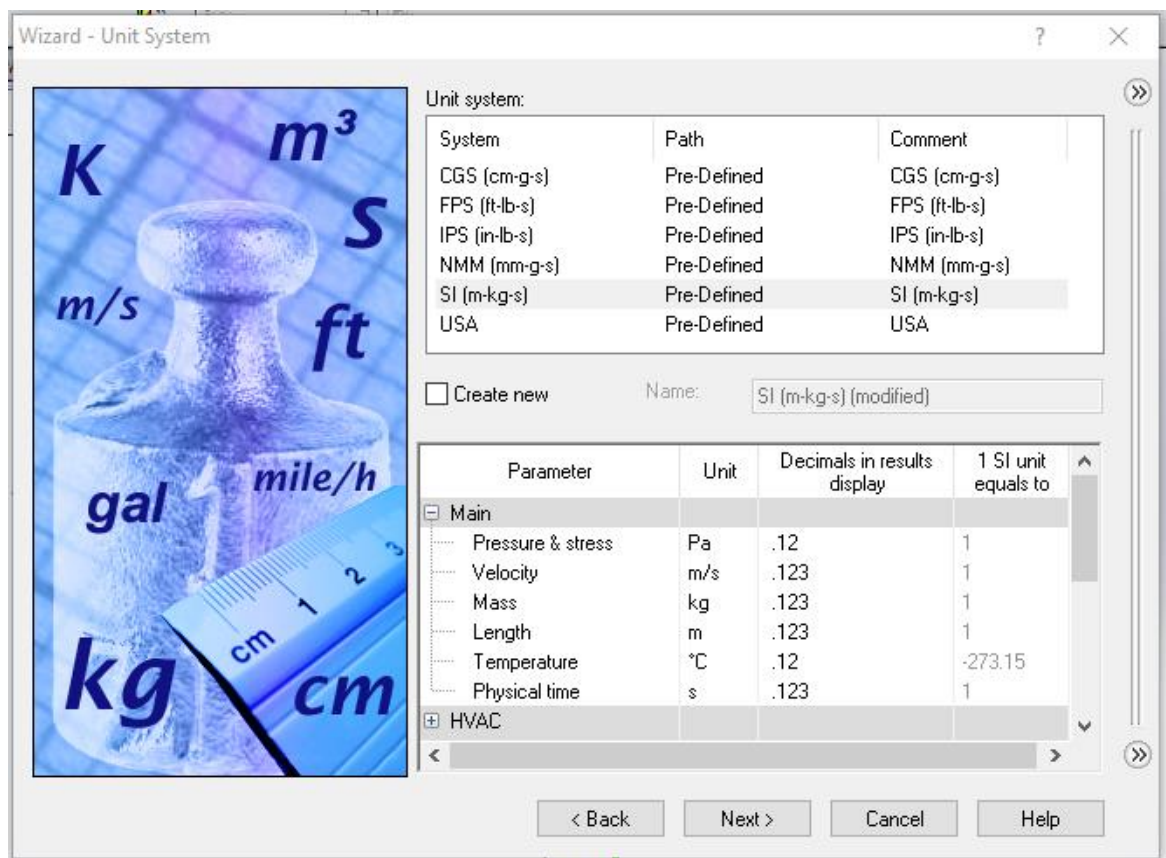


Рис. 3.1.3 – вікно «**Wizard – Unit System**»

Наступним кроком буде вибір методу аналітичного типу дослідження, вікно -«**Wizard – Analysis Type**», на вибір даються внутрішній та зовнішній тип аналізу, вибираємо внутрішній натискаючи на «**Internal**» та ставимо галочку, як показано на рисунку 3.1.4, «**Exclude cavities without flow conditions**», оскільки симуляція проводиться в закритому середовищі, та задаємо температуру навколишнього середовища, $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, продовжуємо натиснувши команду «**Next**».

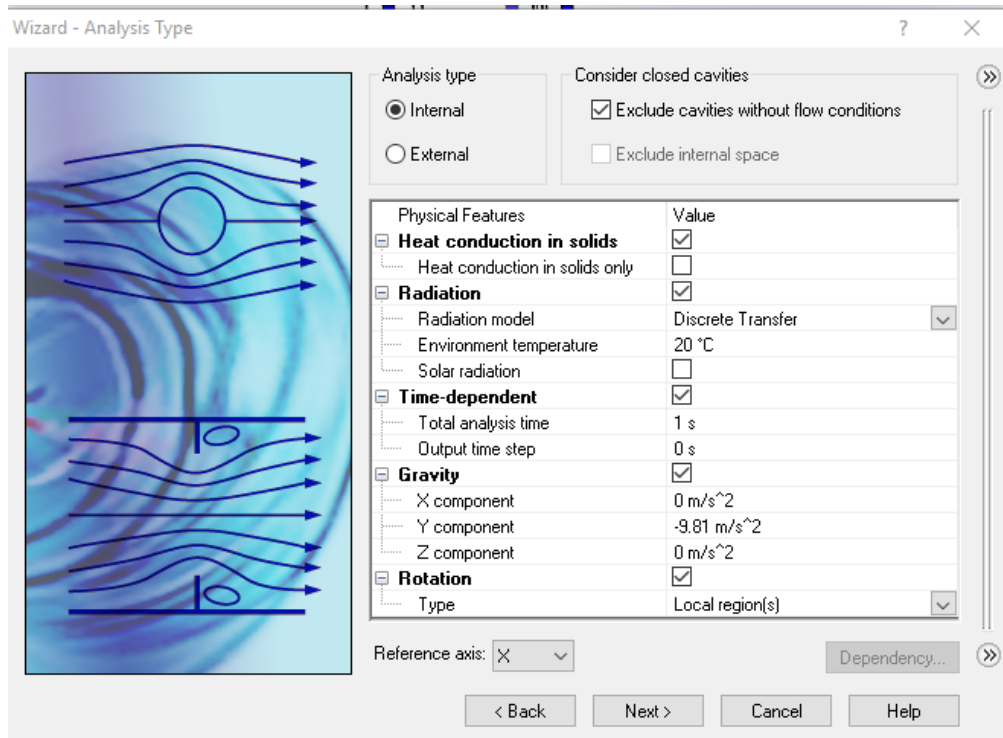


Рис. 3.1.4 – вікно -«**Wizard – Analysis Type**»

Дальше вибираємо рідину, яка буде протікати (рисунок 3.1.5. – вікно - «**Wizard – Default Fluid**»), було вибрано воду та компресовану воду, у розділі «**Flow Characteristic**» вибираємо «**Flow type**» - «**Laminar and Turbulent**», також ставимо галочку напроти розділу «**Cavitation**», вибираємо команду «**Next**».

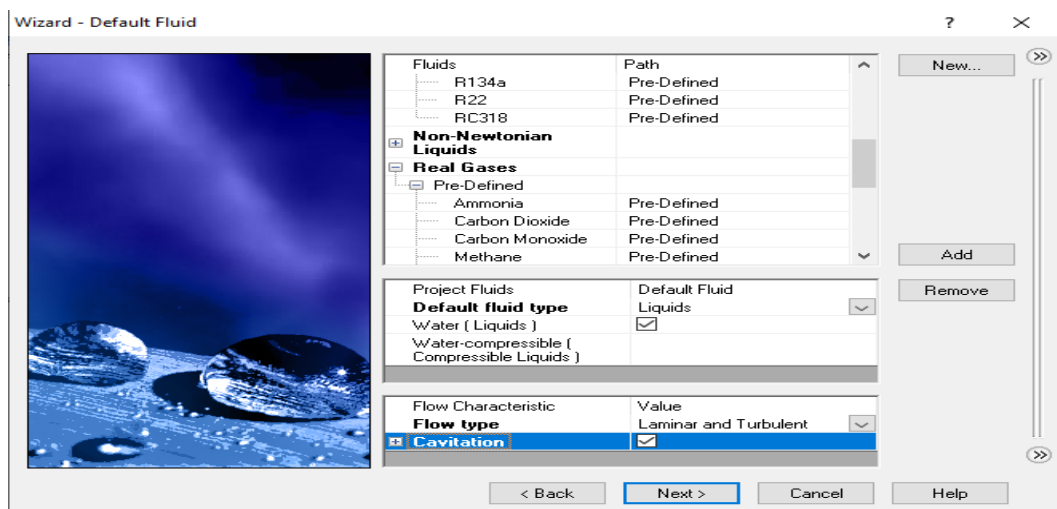


Рис. 3.1.5 – вікно -«**Wizard – Default Fluid**»

На рисунку 3.1.6 – вікно «**Wizard – Default Solid**» та рисунку 3.1.7 – вікно «**Wizard – Default Fluid**» натискаємо на гарячу клавішу «**Next**», оскільки стандартні параметри задовольняють початковим параметрам.

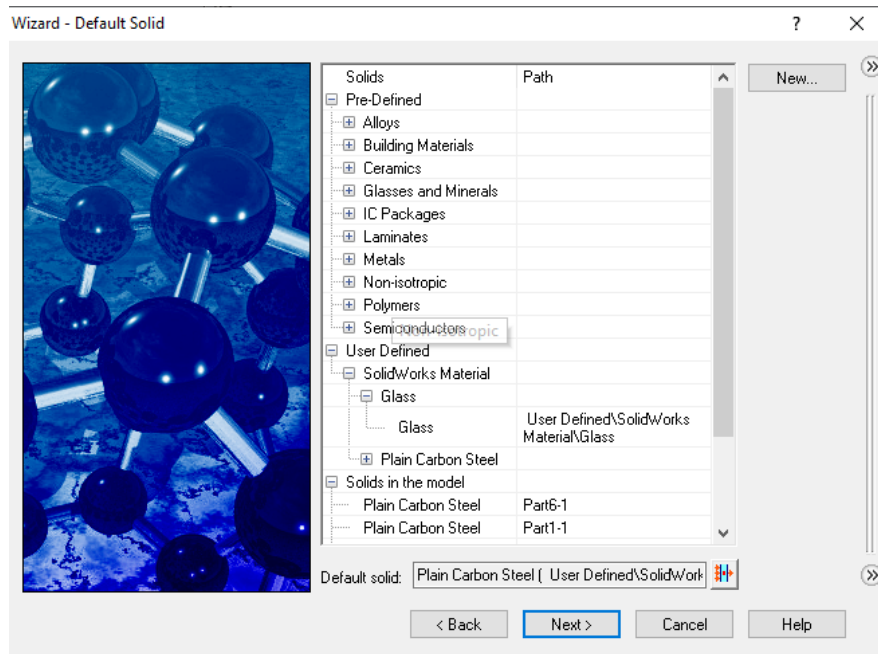


Рис. 3.1.6 – вікно «**Wizard – Default Solid**»

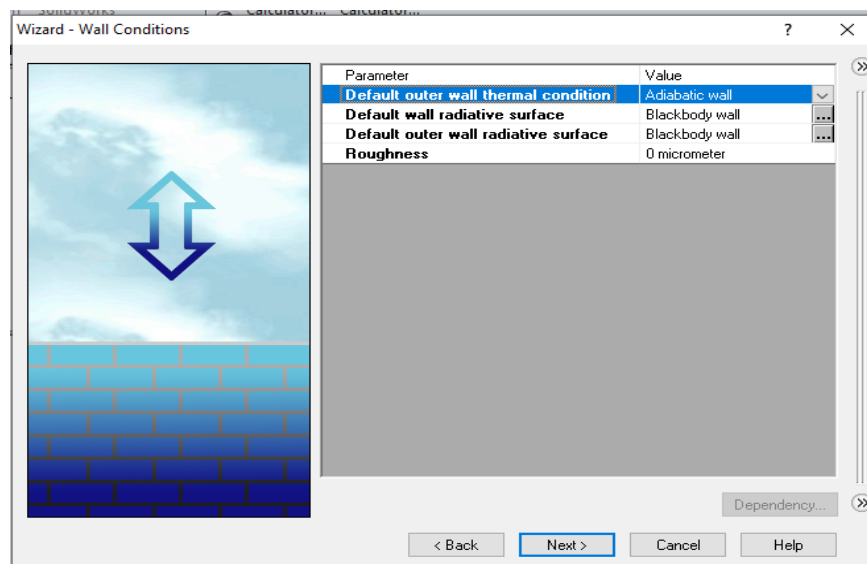


Рис. 3.1.7 – вікно «**Wizard – Default Fluid**»

Вікно - «**Wizard – Initial Conditions**», що зображено на рисунку 3.1.8, вибираємо у панелі «**Thermodynamic Parameters**», задаємо тиск у поверхню «**Pressure**» та «**Temperature**» - які задані у початкових параметрах, для того щоб продовжити потрібно натиснути команду «**Next**».

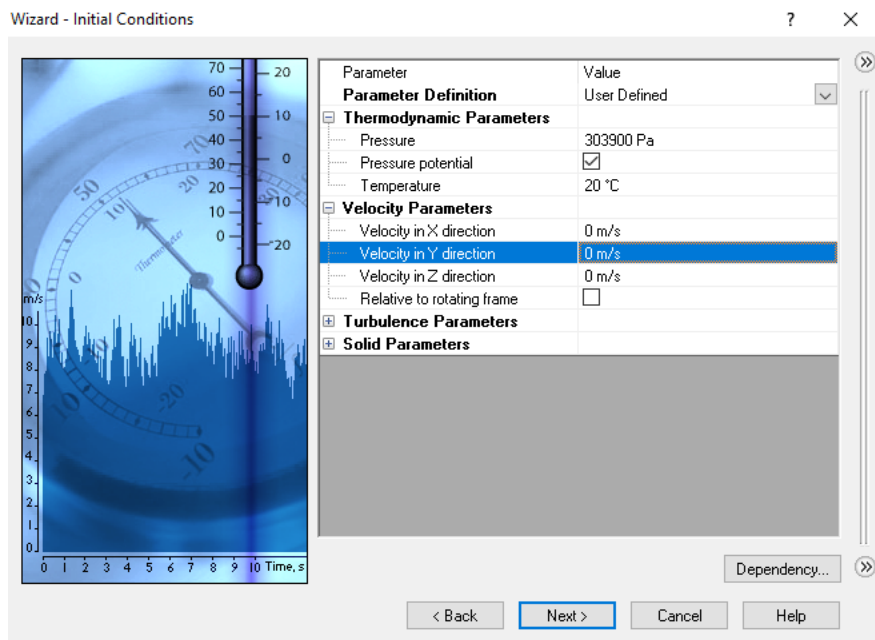


Рис. 3.1.8 – вікно -«**Wizard – Initial Conditions**»

У вікні «**Wizard – Results and Geometry Resolution**»(рисунок 3.1.9.) вибираємо розмір сітки «5» та натискаємо гарячу кнопку «**Finish**».

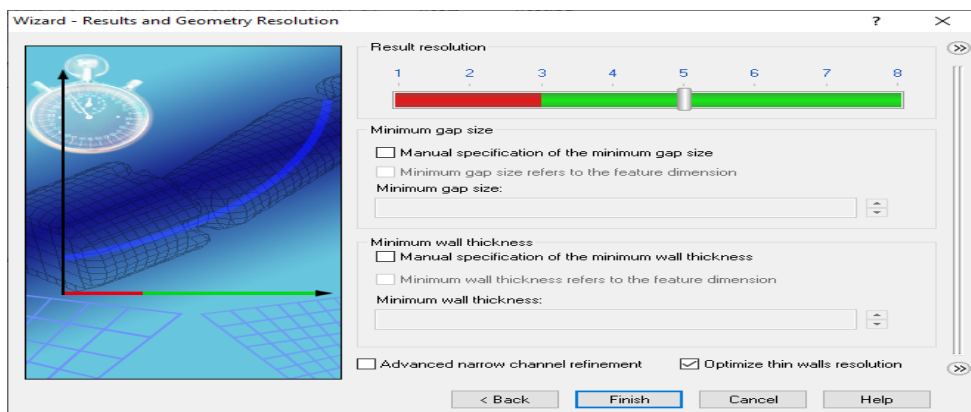


Рис. 3.1.9 – вікно -«**Wizard – Results and Geometry Resolution**»

Після того як були виконані попередні команди з'являється робоче поле для роботи зі SolidWorks Flow Simulation, яке представлено на рисунку 3.1.10.

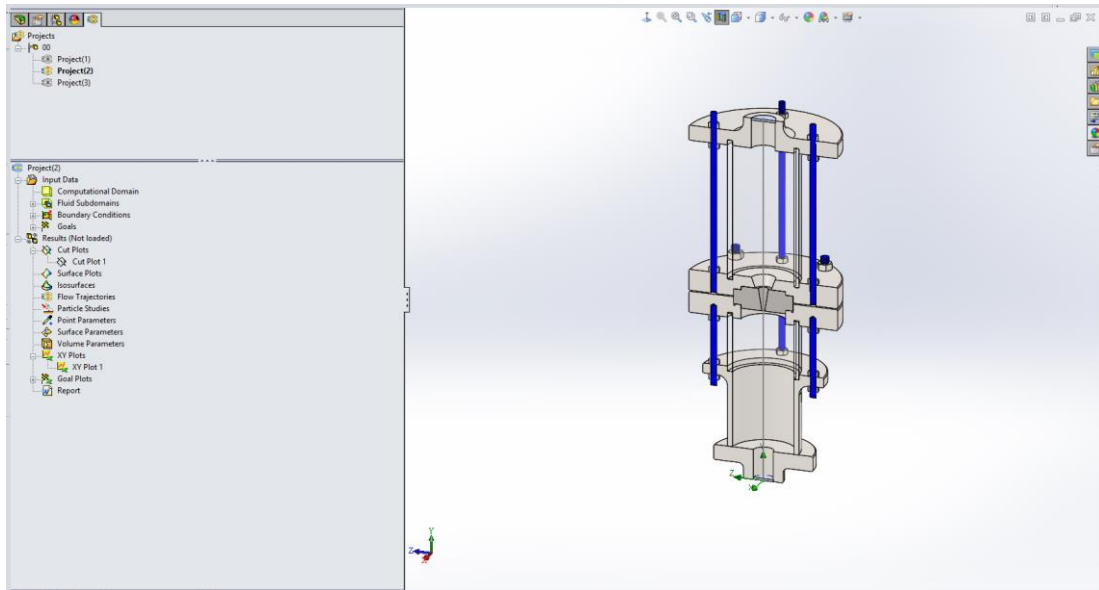


Рис. 3.1.10 – Робоче поле SolidWorks Flow Simulation

Наступним кроком потрібно обрати обчислювану область, вона встановлюється автоматично, для того щоб її підлаштувати під робоче поле потрібно натиснути по іконці «**Computational Domain**» правою кнопкою миші та вибрати «**Edit Definition...**»(рисунок 3.1.11).

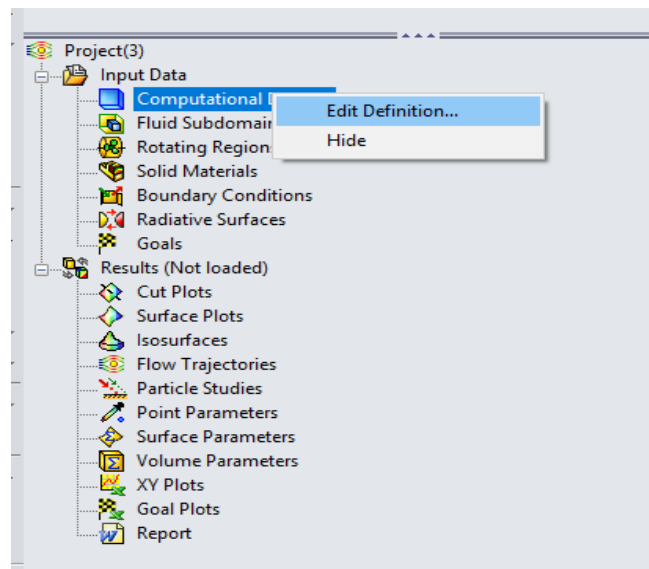


Рис. 3.1.11 – Flow Simulation Analysis

Для подальшої роботи з SolidWorks Flow Simulation потрібно викликати команду «**Create Lids**» (рисунок 3.1.1), щоб створити уявні кришки, для кращого

розрахунку, їх розміщуємо на краях моделі гідродинамічного кавітаційного апарата статичного типу.

Задаємо умови, які задані на вхідних параметрах так щоб, тиск був на вході в гідродинамічний кавітаційний апарат стандартного типу, а кількість рідини яка виходить була на виході. За допомогою команди «**Boundary Conditions**», натиснувши праву кнопку миші вибираємо «**Insert Boundary Conditions**», після чого відкривається робоча зона в якій задаємо умови тиску та вибираємо поверхню з якої почнеться рух рідини в досліджуваному апараті (рисунк 3.1.11(a)).

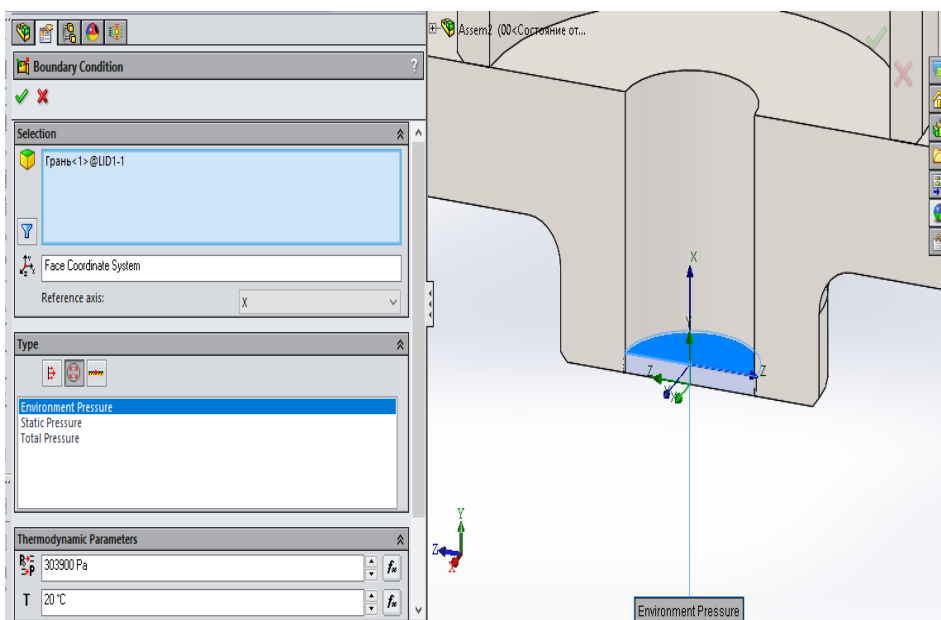


Рис. 3.1.11(a) – Boundary Conditions

Аналогічно, повторюємо і для кількості рідини, що виходить, та задаємо її та поверхню до якої вона виходить(рисунк 3.1.11(б)).

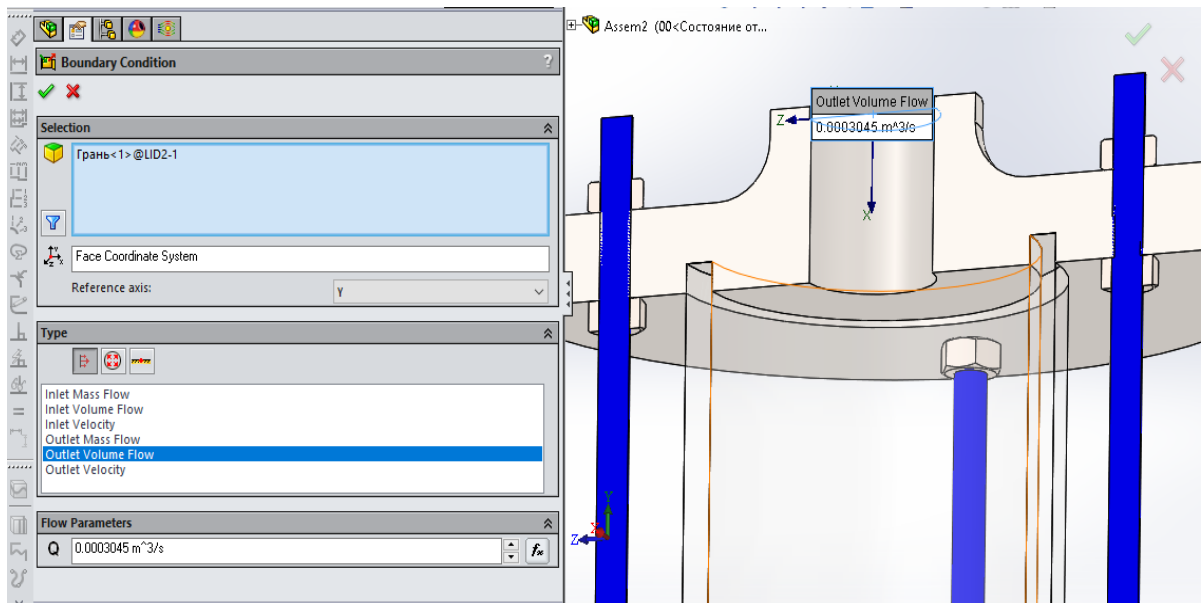


Рис. 3.1.11(б) – Boundary Conditions

Щоб почати симуляцію потрібно вибрати на додатковій панелі Flow Simulation, команду «**Run**»(рисунок 2.1(а)) або правою кнопкою миші по назві проекту. Після чого відкривається вікно «**Run**», в якій задаємо ресурси які необхідні для якісної симуляції представлено на рисунку 3.1.12. По завершенню вибору необхідних ресурсів натискаємо команду «**Run**».

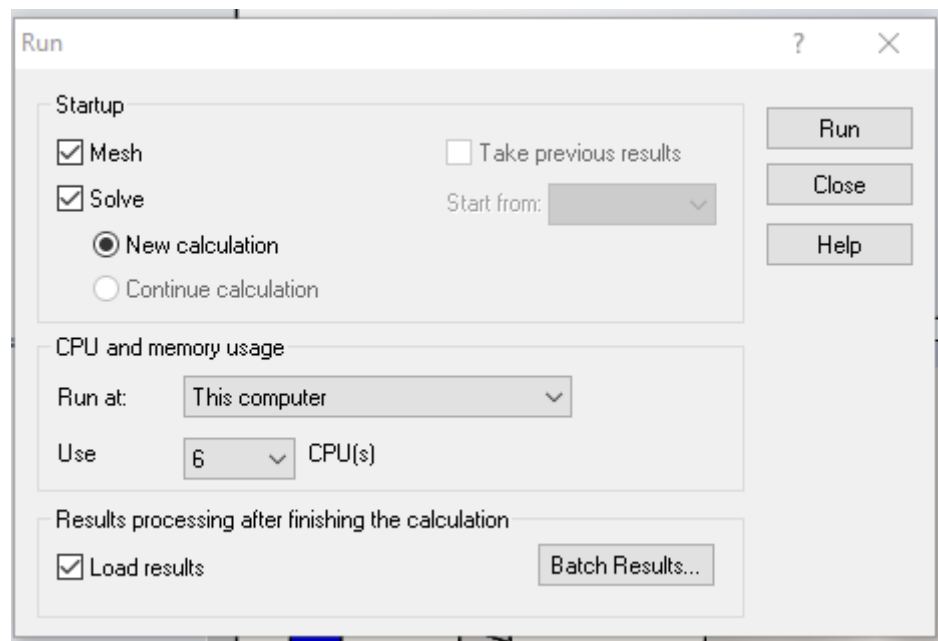


Рис. 3.1.12 – вікно команди «Run»

По завершенню підготовки вискакує вікно «**Solver**» на якому бачимо процес симуляції, зображено на рисунку 3.1.13.

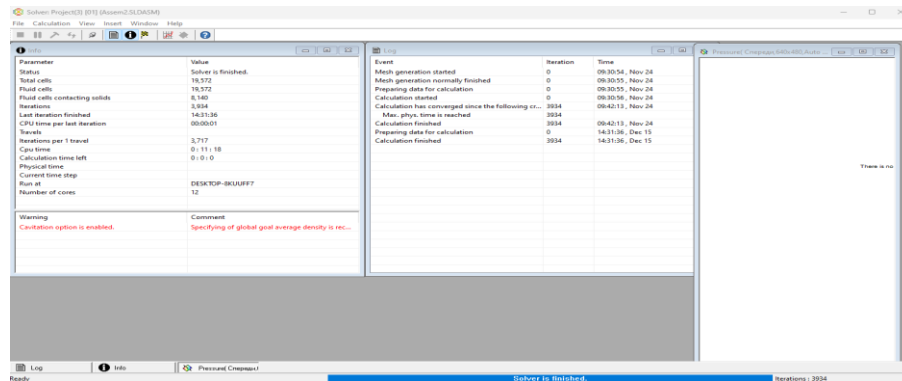


Рис. 3.1.13 – вікно команди «**Solver**»

Після вище згаданих маніпуляцій отримуємо готові результати у команді «**Results**» з'являються недоступні раніше команди по яких можна побачити, як змінюється поведінка бульбашки в даній симуляції.

Аналогічно створюємо симуляцію для вхідного патрубку діаметром 5мм та 8мм із збереженням відношення кута до діаметра на виході з діафрагми.

По завершенню роботи отримуємо готові результати симуляції.

3.2. Результати та порівняння

Готові результати виводимо в Excel файл, для кращої роботи з готовими результатами.

Для початку покажемо результат симуляції розподілу тиску вздовж гідродинамічного кавітаційного апарата статичного типу. Результати симуляції демонструють зміну тиску вздовж робочої зони апарата, що залежить від геометрії діафрагми та швидкості потоку рідини. Зокрема, виявлено, що в зоні звуження (діафрагма) відбувається суттєве зниження тиску, яке може досягати значень, нижчих за тиск насичення рідини, що сприяє утворенню кавітаційних бульбашок. Після проходження зони мінімального перерізу тиск поступово відновлюється, але інтенсивність кавітаційних явищ залежить від діаметра діафрагми. Ці дані дозволяють детально проаналізувати ефективність роботи апарата та визначити оптимальні параметри для його конструкції.

Результати першої симуляції розподілу тиску вздовж гідродинамічного кавітаційного апарата статичного типу наведено на рис 3.2.1:

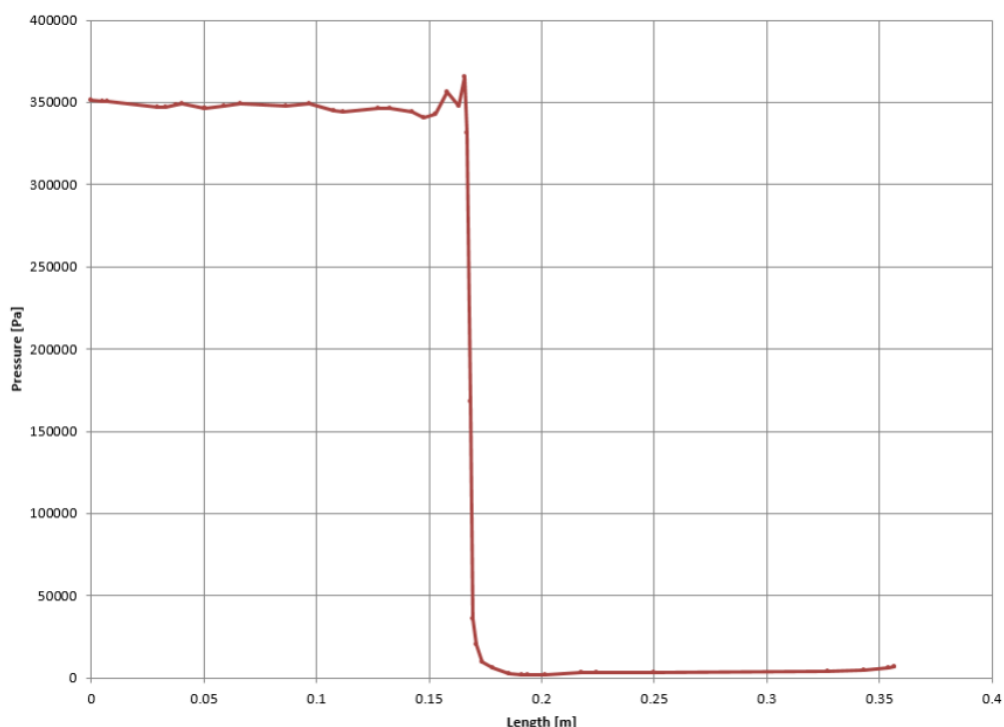


Рис. 3.2.1 - Розподілення тиску потоку рідини вздовж гідродинамічного апарата статичного типу, через діафрагму діаметром 3 мм, вихідний тиск 3 атм, продуктивність 18,27 л/хв

Результати другої симуляції розподілу тиску вздовж гідродинамічного кавітаційного апарата статичного типу наведено на рис 3.2.2:

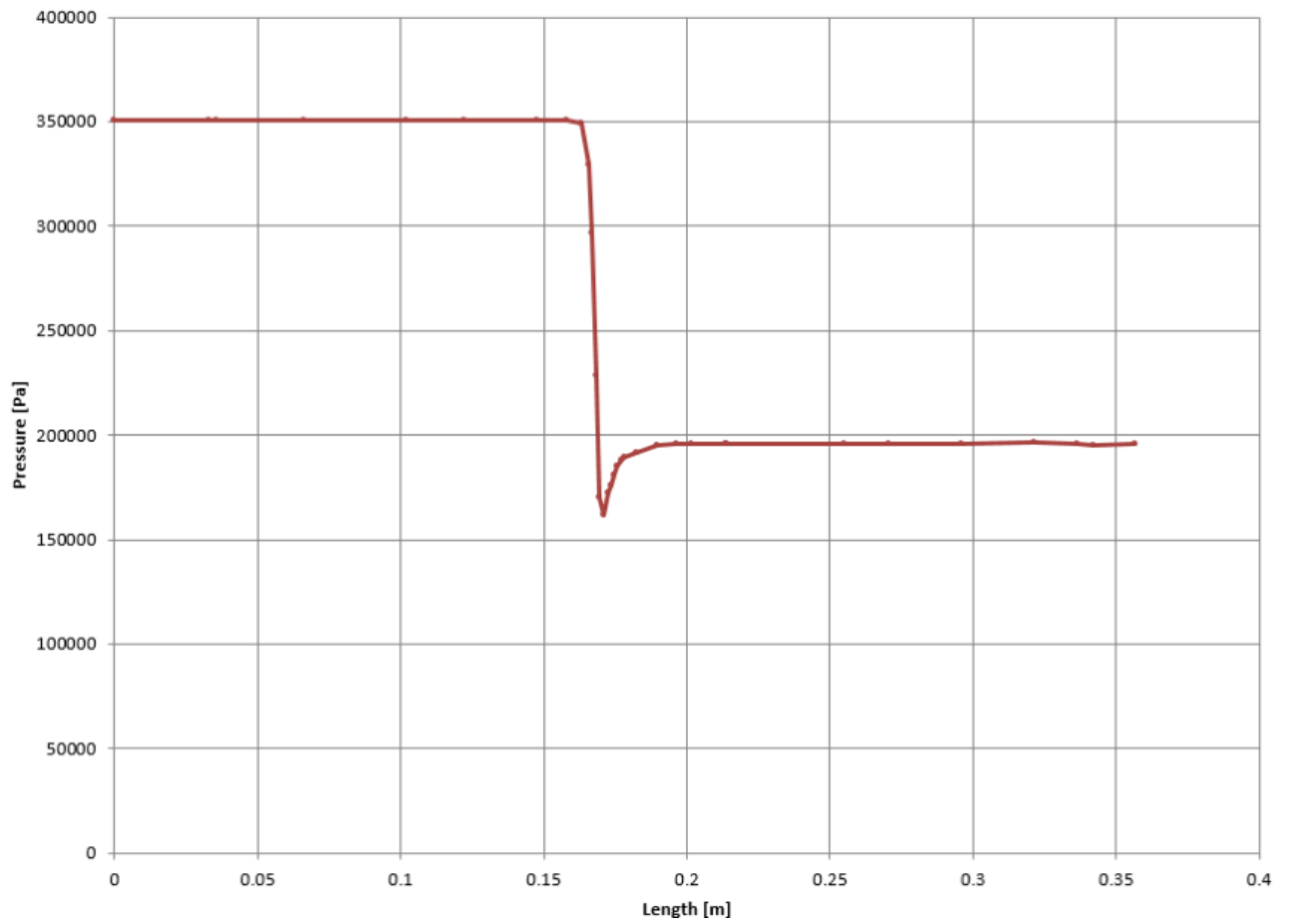


Рис. 3.2.2 - Розподілення тиску потоку рідини вздовж гідродинамічного апарата статичного типу, через діафрагму діаметром 5 мм, вихідний тиск 3 атм, продуктивність 18,27 л/хв

Результати третьої симуляції розподілу тиску вздовж гідродинамічного кавітаційного апарата статичного типу наведено на рис 3.2.3:

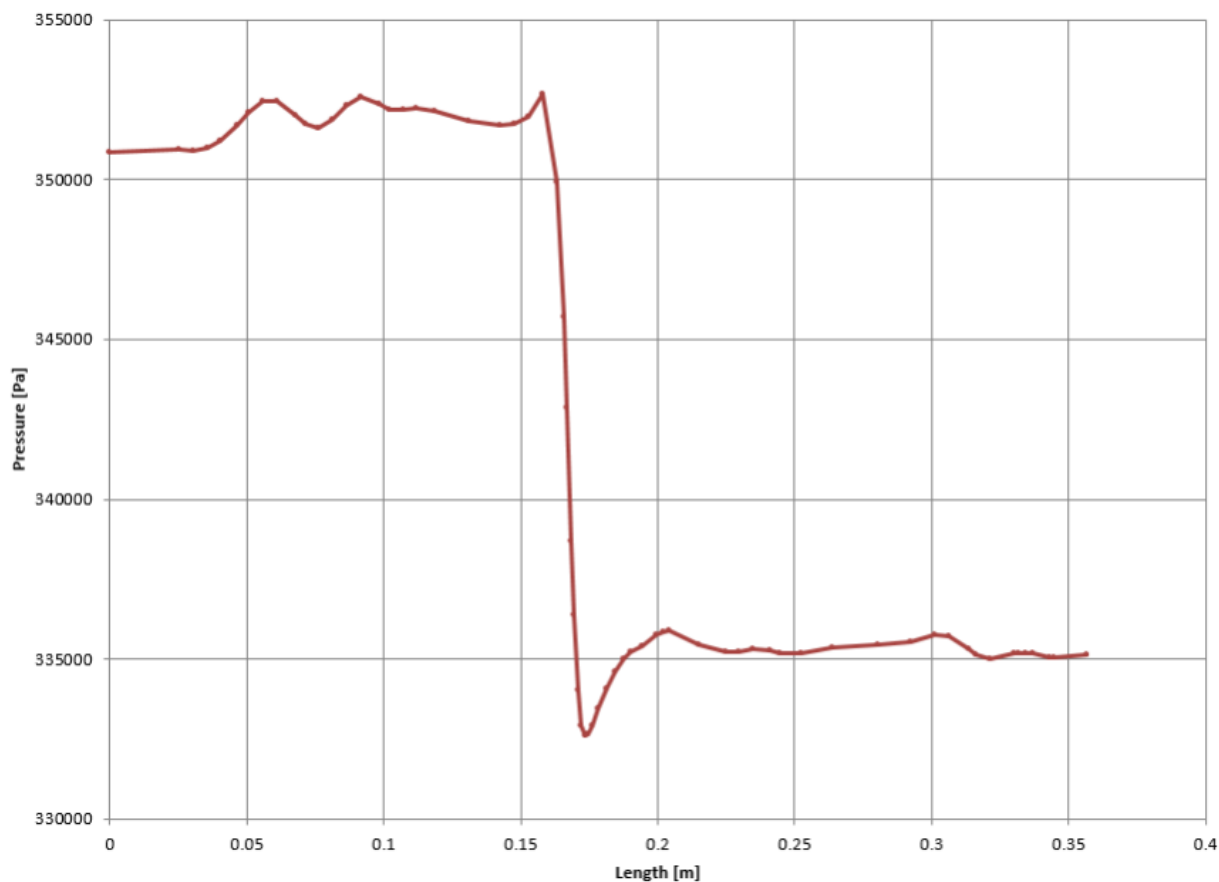


Рис. 3.2.3 - Розподілення тиску потоку рідини вздовж гідродинамічного апарата статичного типу, через діафрагму діаметром 8 мм, вихідний тиск 3 атм, продуктивність 18,27 л/хв

У таблиці 3.2.1 наведено результати симуляцій тиску вздовж гідродинамічного кавітаційного апарата статичного типу. У цій таблиці показано, розподілення тиску в кожній точці симуляції для діафрагм діаметром 3 мм, 5 мм та 8 мм. Зокрема, зі зменшенням діаметра діафрагми спостерігається різке зменшення тиску у вузькій ділянці, що спричиняє інтенсивні кавітаційні явища. Це пояснюється тим що при підвищенні швидкості потоку рідини в обмеженому перерізі, що призводить до зниження статичного тиску згідно з рівнянням Бернуллі. На основі отриманих результатів можна стверджувати, що оптимізація діаметра діафрагми є критичним значенням для забезпечення ефективної роботи гідродинамічного кавітаційного апарата. Вибір діаметра

повинен враховувати баланс між інтенсивністю кавітаційних процесів, робочими параметрами тиску і швидкості, а також вимогами до надійності та довговічності обладнання.

Таблиця 3.2.1 – результати симуляцій тиску вздовж кавітаційного гідродинамічного апарата статичного типу:

d _{от} = 3 мм		d _{от} = 5 мм		d _{от} = 8 мм	
Відстань (м)	Тиск (Па)	Відстань (м)	Тиск (Па)	Відстань (м)	Тиск (Па)
0	351241,9041	0	350849,45	0	350849,3701
0,00475196	350576,4441	0,0328425	350825,83	0,0353962	350989,8501
0,02919436	347352,8514	0,0353962	350831,54	0,0405035	351202,9302
0,03758504	348663,0532	0,0660404	350572,19	0,0674996	352012,3567
0,04050354	349141,099	0,101792	351065,47	0,0915772	352572,3157
0,05874414	348033,3635	0,1222214	350879,81	0,0981438	352350,6588
0,06604038	349136,2776	0,1477583	351029,96	0,101792	352185,4926
0,08646986	348094,1807	0,157973	350515,72	0,1068993	352171,3986
0,0966846	349215,7716	0,1630804	349188,41	0,1120067	352213,7229
0,10762896	344976,0121	0,1656341	329640,9	0,1185733	352143,5582
0,1120067	344545,2723	0,1669109	297048,62	0,1309769	351846,5075
0,12732881	346146,6898	0,1681878	228461,93	0,1426509	351720,0824
0,13243618	346211,4992	0,1694646	170570,25	0,1477583	351742,6876
0,14265092	344576,6855	0,1707414	161828,92	0,1528657	351985,1539
0,15797302	356693,6549	0,1726567	172351,91	0,157973	352665,0791
0,16308039	347634,5431	0,1732951	175703,04	0,1630804	349916,6662
0,16563408	365913,4512	0,174572	181172,45	0,181321	334089,201
0,16691092	331382,232	0,1758488	185073,13	0,1844219	334628,5759
0,1694646	36491,90079	0,1773079	187872,34	0,1873404	334995,1241
0,17074145	20571,14954	0,1784011	189195,1	0,1902589	335250,7288
0,17329513	9618,539006	0,182233	191700,03	0,1940894	335406,8857
0,17840111	6559,390396	0,1895293	194866,63	0,1995616	335776,1565
0,18569874	3119,998224	0,1962783	195641,08	0,2021153	335861,2462
0,19117092	2285,854487	0,2013857	195586,79	0,2294762	335249,6676
0,19372461	2313,034593	0,2134245	196214,16	0,2447983	335175,7166
0,20138566	2118,180023	0,2141541	196221,96	0,2637685	335346,562
0,2178022	3618,079518	0,255013	195862,96	0,2805499	335437,2579
0,22436882	3662,807205	0,2703351	196113,04	0,2922239	335558,5539
0,24990567	3343,689851	0,295872	196058,77	0,3060867	335727,0096
0,32688101	4316,506633	0,3214088	196314,81	0,313383	335314,1697
0,34329756	5204,1453	0,3363661	195688,13	0,3214088	335006,7443
0,35396779	6486,165685	0,3418383	195466,71	0,3316236	335210,4994
0,35680222	7005,777048	0,3568022	196065,13	0,3568022	335165,4538

Аналіз даних, наведених у таблиці 3.2.1, дозволяє простежити залежність розподілу тиску вздовж гідродинамічного кавітаційного апарата статичного типу від діаметра діафрагми. З отриманих результатів можна зробити наступні висновки:

1) Для діафрагми діаметром 3 мм спостерігається різкий спад тиску в певній ділянці апарата. Це свідчить про інтенсивне утворення кавітаційних бульбашок внаслідок значного збільшення швидкості рідини та відповідного зниження тиску до значень, нижчих за тиск насичення. Проте подальше різке зростання тиску після виходу з критичної зони може призводити до швидкого схлопування бульбашок, що створює умови для кавітаційної ерозії.

2) Для діафрагми діаметром 5 мм падіння тиску є менш різким, а зона кавітації дещо розширюється. Це пояснюється зменшенням швидкості потоку в порівнянні з діафрагмою діаметром 3 мм, що призводить до меншої інтенсивності кавітаційних явищ. Таким чином, кавітаційна ерозія зменшується, але зона зниженого тиску охоплює більшу довжину апарата.

3) Для діафрагми діаметром 8 мм зміни тиску є найменш вираженими. Потік рідини в такому діафрагмі характеризується меншою швидкістю, що зменшує ймовірність утворення кавітаційних бульбашок. Водночас, кавітаційні процеси практично не виникають, що свідчить про значне зниження ефективності кавітаційного апарата, якщо основною метою є інтенсифікація процесів, наприклад, диспергування або очищення середовищ.

Таким чином, результати симуляцій демонструють, що діаметр діафрагми є ключовим параметром, що впливає на інтенсивність і характер кавітаційних явищ. Зменшення діаметра призводить до посилення кавітації, однак підвищує ризик ерозійного зношування. З іншого боку, збільшення діаметра знижує ефективність кавітаційного процесу, оскільки тиск залишається на вищому рівні і кавітаційні умови не досягаються.

Оптимізація діаметра діафрагми залежить від конкретної задачі: для інтенсифікації кавітаційних процесів необхідно вибирати менші діаметри, але з урахуванням заходів із захисту від ерозії. Для забезпечення стабільної та

довговічної роботи обладнання слід застосовувати оптимальні конструктивні рішення та методи математичного моделювання, які дозволяють мінімізувати небажані ефекти та підвищити ефективність роботи кавітаційного апарата.

Також показано зміну швидкості потоку рідини вздовж гідродинамічного кавітаційного апарата статичного типу для різних діаметрів діафрагми.

Результати першої симуляції розподілу швидкості вздовж гідродинамічного кавітаційного апарата статичного типу наведено на рис 3.2.4:

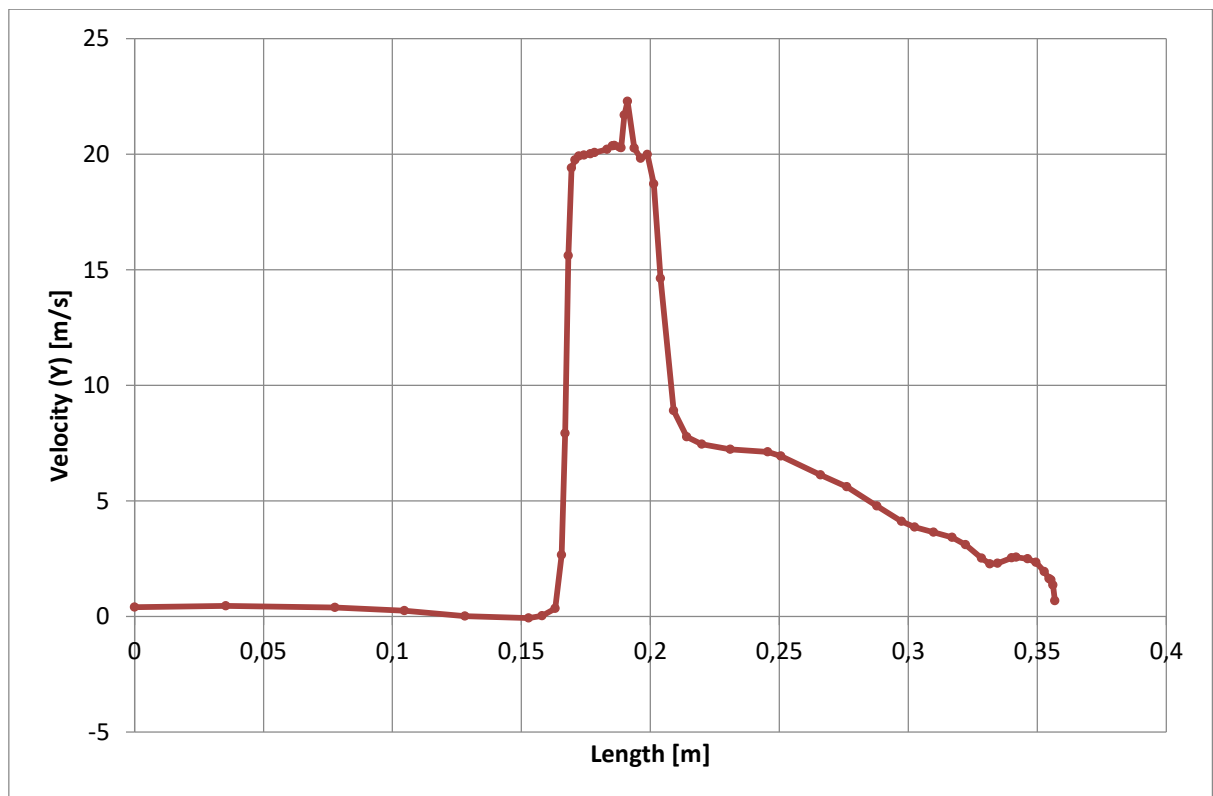


Рис. 3.2.4 - Розподілення швидкості потоку рідини вздовж гідродинамічного апарата статичного типу, через діафрагму діаметром 3 мм, вихідний тиск 3 атм, продуктивність 18,27 л/хв

Результати другої симуляції розподілу швидкості вздовж гідродинамічного кавітаційного апарата статичного типу наведено на рис 3.2.5:

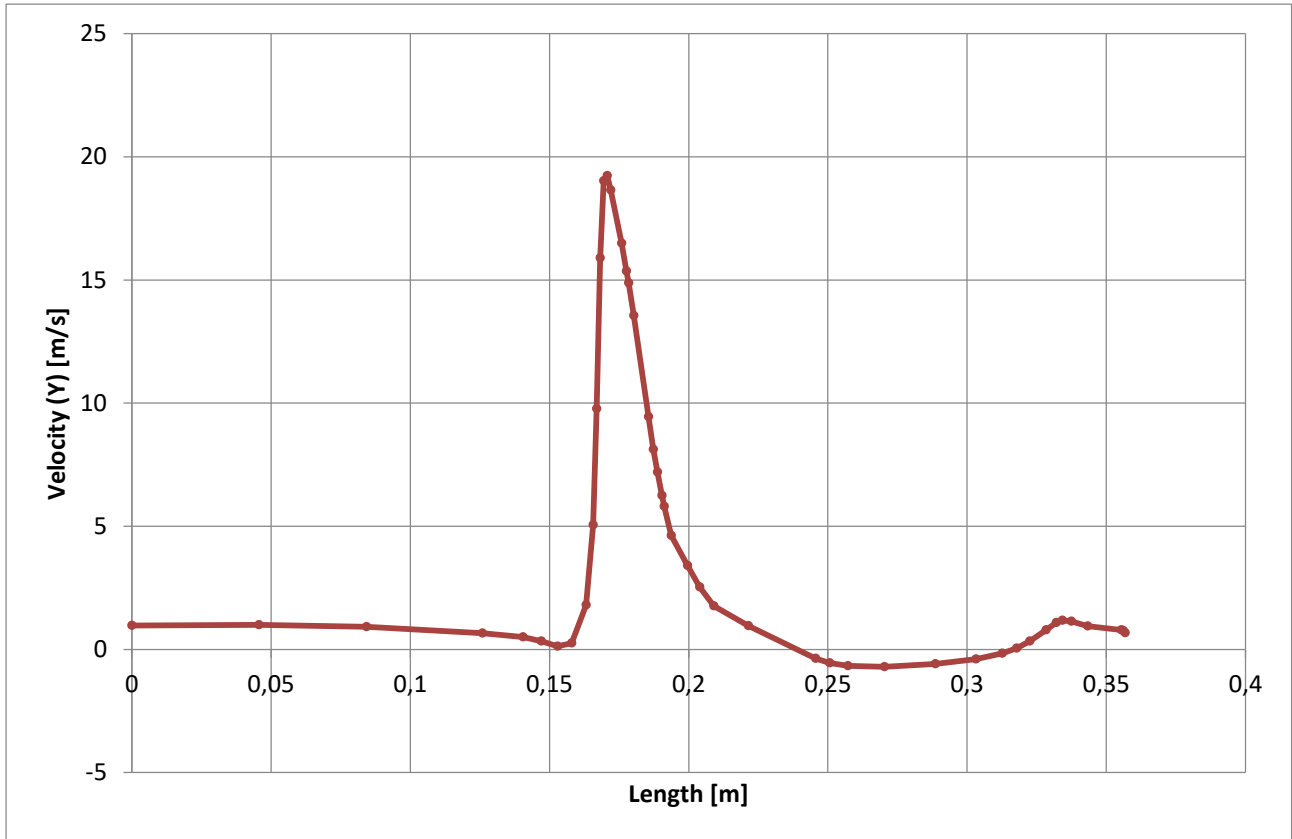


Рис. 3.2.5 - Розподілення швидкості потоку рідини вздовж гідродинамічного апарата статичного типу, через діафрагму діаметром 5 мм, вихідний тиск 3 атм, продуктивність 18,27 л/хв

Результати третьої симуляції розподілу швидкості вздовж гідродинамічного кавітаційного апарата статичного типу наведено на рис 3.2.6:

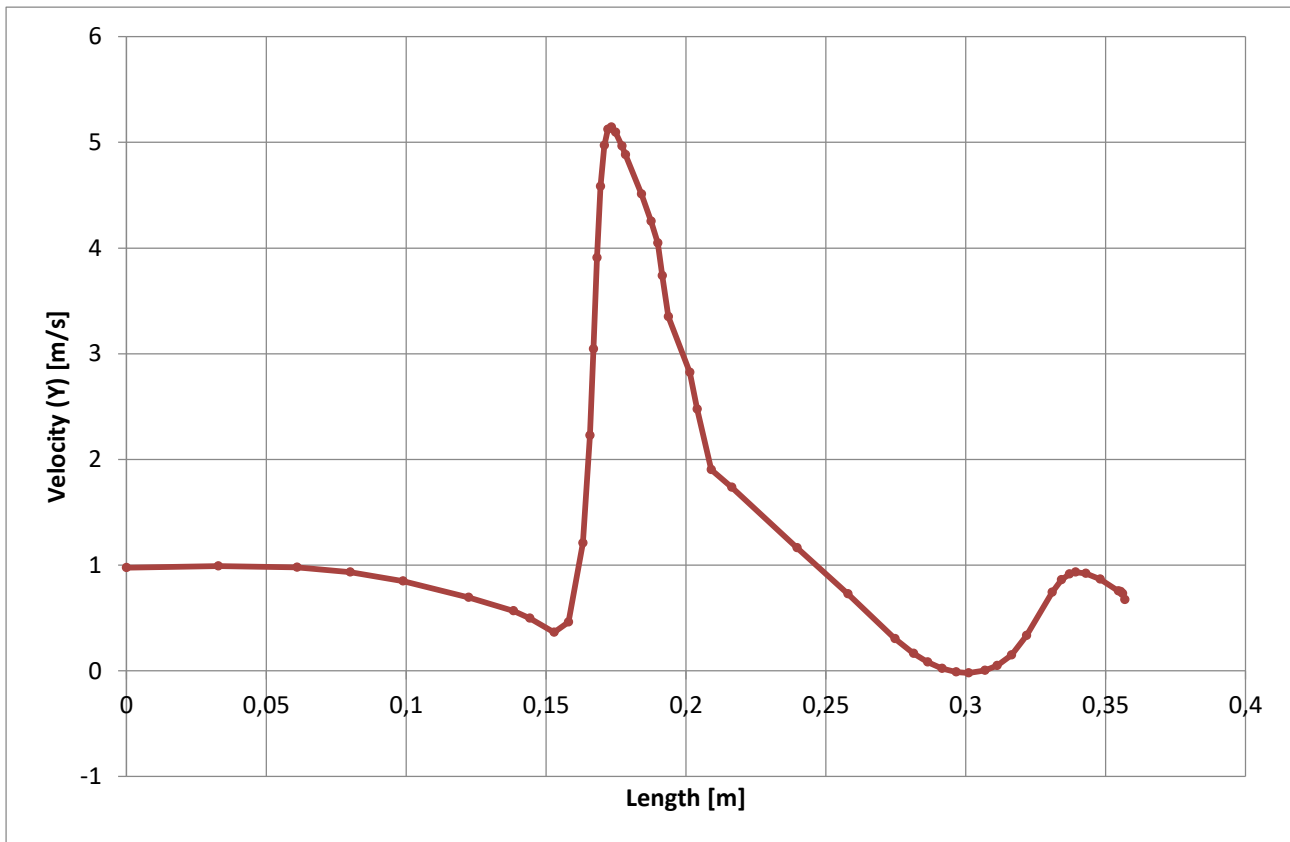


Рис. 3.2.5 - Розподілення швидкості потоку рідини вздовж гідродинамічного апарата статичного типу, через діафрагму діаметром 8 мм, вихідний тиск 3 атм, продуктивність 18,27 л/хв

Таблиця 3.2.2 – результати симуляцій швидкості рідини вздовж кавітаційного гідродинамічного апарата статичного типу:

d _{от} = 3 мм		d _{от} = 5 мм		d _{от} = 8 мм	
Відстань (м)	Швидкість (м/с)	Відстань (м)	Швидкість (м/с)	Відстань (м)	Швидкість (м/с)
0	0,407941697	0	0,975896979	0	0,975983578
0,035396168	0,455729228	0,045610906	0,995094056	0,032842484	0,990369228
0,104710462	0,25090903	0,125869562	0,665867896	0,079903241	0,933260807
0,128058434	0,022264669	0,140462044	0,507102512	0,098873468	0,847715562
0,152865655	-0,073497726	0,147028662	0,336669493	0,122221441	0,694730959
0,157973024	0,025165705	0,152865655	0,124085712	0,138273172	0,56575633
0,163080393	0,347735124	0,157973024	0,263238831	0,144110165	0,496187309
0,165634077	2,658874678	0,163080393	1,80930462	0,152865655	0,363115283
0,166910919	7,927652757	0,165634077	5,048311797	0,157973024	0,459786575
0,168187762	15,61208195	0,166910919	9,776700452	0,163080393	1,208119423
0,169464604	19,40293974	0,168187762	15,89704807	0,165634077	2,227189661
0,170741446	19,75905	0,169464604	19,02609723	0,166910919	3,043208383
0,172337499	19,91881043	0,170741446	19,22683607	0,168187762	3,908514165
0,174252762	19,96765874	0,172018288	18,64085456	0,169464604	4,581870235
0,176806447	20,01712119	0,175848815	16,49596337	0,170741446	4,971770146
0,178401111	20,07394139	0,17767228	15,36065345	0,172018288	5,123205565
0,183190658	20,21426583	0,178401111	14,88173821	0,17329513	5,143732883
0,185333929	20,36114222	0,18022656	13,55313015	0,174754379	5,09562901
0,186063553	20,38260068	0,185516335	9,439397834	0,177125657	4,96356121
0,188070019	20,31392331	0,187340395	8,124999135	0,178401111	4,883933211
0,188617237	20,28024365	0,188799643	7,203102724	0,184057087	4,51167321
0,18989408	21,69933433	0,190441298	6,252392505	0,187522801	4,25227872
0,191170922	22,29526868	0,191170922	5,803427589	0,18989408	4,046787658
0,193724606	20,27345984	0,193724606	4,629917028	0,191535734	3,738721119
0,196278291	19,82972577	0,199561599	3,399428451	0,193724606	3,350582874
0,198831975	19,98759447	0,203939344	2,535808137	0,20138566	2,823681712
0,20138566	18,71517809	0,209046713	1,765508656	0,203939344	2,47456545
0,203939344	14,62619644	0,221450324	0,960659266	0,209046713	1,901431635
0,209046713	8,905281712	0,24552792	-0,371325126	0,216342955	1,73485296
0,214154082	7,772312216	0,250635289	-0,554408782	0,239690927	1,1638708
0,219991075	7,456610416	0,257201906	-0,65958512	0,25793153	0,728106582
0,230935437	7,237043654	0,270335141	-0,699852571	0,274712886	0,304013253
0,24552792	7,120087658	0,288575744	-0,592549084	0,281279503	0,165146338
0,250635289	6,945480937	0,303168227	-0,391229479	0,286386872	0,081105744
0,265957396	6,12496098	0,312653341	-0,153644656	0,291494241	0,021783882
0,276172134	5,616084579	0,31776071	0,054898471	0,29660161	-0,011119592
0,28784612	4,780755109	0,322503267	0,331587141	0,300979355	-0,019963802
0,297331234	4,121788093	0,32834026	0,796131818	0,306816348	0,004505629
0,302438603	3,863993298	0,33198838	1,083855005	0,311194092	0,048524583
0,317031086	3,418028139	0,334177253	1,177703258	0,316301461	0,147976423
0,322138455	3,102939194	0,337460561	1,138843585	0,321773642	0,333640108
0,331623568	2,268618963	0,343297555	0,94065545	0,348040111	0,866772869
0,34949936	2,345721837	0,355338097	0,794885525	0,354606035	0,75466673
0,354606035	1,631691639	0,35607016	0,766910827	0,355338097	0,750108882
0,356802223	0,674453993	0,356802223	0,674418798	0,356802223	0,674422279

Аналізуючи таблицю 3.2.2 можна зробити висновки, що із збільшенням діаметра діафрагми швидкість рідини при проходженні через нього зменшується, це пов'язано з тим що площа перерізу потоку зростає, що зменшує гідродинамічний опір і, відповідно, швидкість руху рідини. Це явище відповідає рівнянню нерозривності потоку, згідно з яким витрата залишається постійною, а швидкість залежить від площі перерізу. Зменшення швидкості потоку знижує інтенсивність кавітаційних явищ, що може впливати на ефективність роботи апарата залежно від поставлених завдань.

Утворення паро-газової фази в гідродинамічному кавітаційному апараті статичного типу є одним із ключових процесів, що визначає ефективність його роботи. Цей процес виникає внаслідок локального зниження тиску рідини до рівня, нижчого за тиск насиченої пари при поточній температурі. В результаті в рідині утворюються бульбашки, які складаються з водяної пари та розчинених газів.

Основними зонами утворення паро-газової фази є ділянки апарата з високою швидкістю потоку або різкими перепадами геометрії, наприклад, у діафрагмі чи в місцях звуження каналу. У таких умовах кінетична енергія потоку перетворюється на потенціальну, що спричиняє зниження локального статичного тиску. Після утворення бульбашок відбувається їх перенесення потоком у зони підвищеного тиску, де вони колапсують, вивільняючи значну кількість енергії у вигляді ударних хвиль, мікроструменів і тепла.

Тому проводимо симуляцію утворення паро-газової фази вздовж гідродинамічного кавітаційного апарата статичного типу.

Результат симуляції утворення паро-газової фази вздовж гідродинамічного кавітаційного апарата статичного типу наведено на рис 3.2.6:

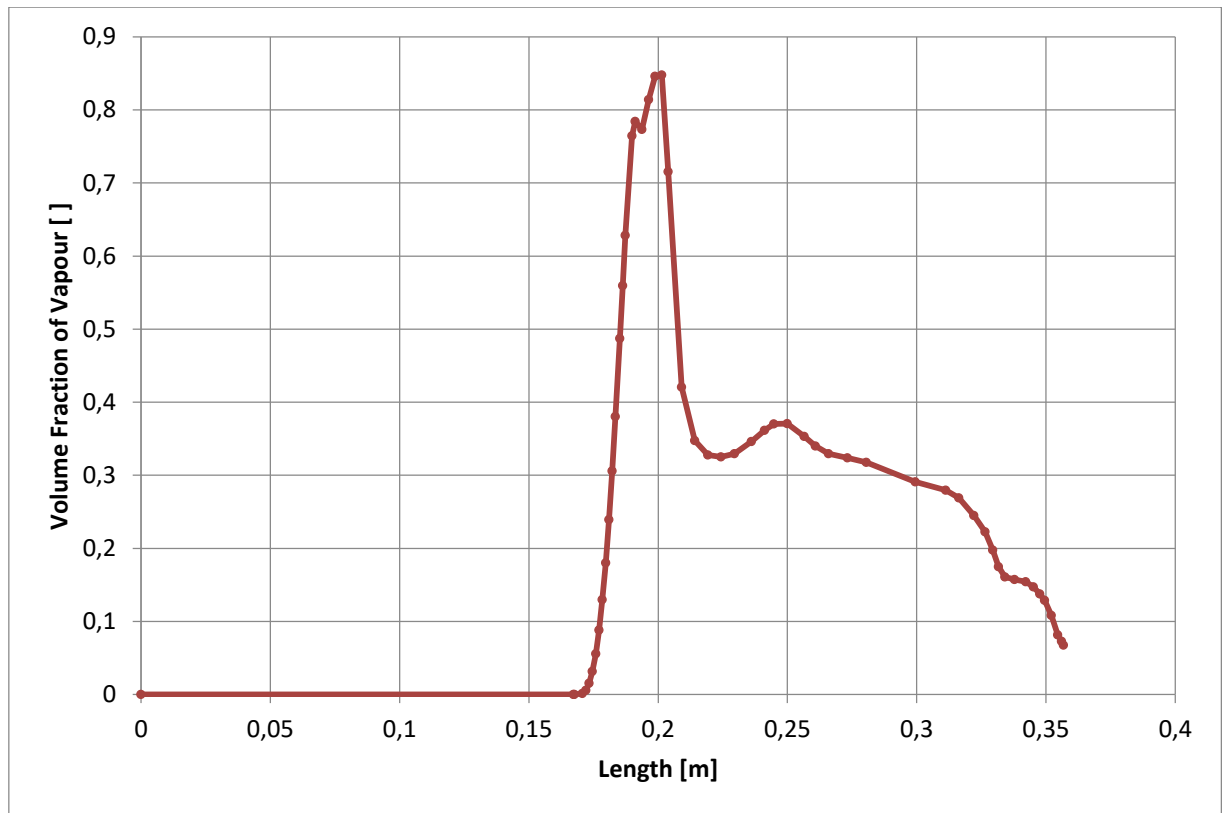


Рис. 3.2.6. – Утворення паро-газової фази у гідродинамічному кавітаційному апараті статичного типу, для діаметра діафрагми 3 мм, вихідний тиск 3 атм, продуктивність 18,27 л/хв

Для діафрагм діаметром 5 мм та 8 мм симуляція показала, що паро-газова фаза через недостатньо низький тиск пара неутворюється. Цей результат свідчить, що збільшення діаметра діафрагми призводить до зменшення швидкості потоку рідини, що, у свою чергу, впливає на динамічний розподіл тиску. Через недостатнє зниження локального тиску, який не досягає рівня насиченої пари при заданій температурі. Це пояснюється тим, що більші діаметри створюють умови для менш інтенсивного прискорення потоку в області діафрагми, що є критично важливим для ініціації процесу кавітації.

Відсутність паро-газової фази для цих діаметрів може мати як позитивні, так і негативні наслідки. З одного боку, це зменшує ризик кавітаційної ерозії і пошкодження матеріалу в ділянках стінок, що сприяє підвищенню довговічності апарата. Ці результати симуляції вказують на необхідність точного

налаштування геометричних параметрів гідродинамічного апарата залежно від його цільового призначення. Для досягнення оптимальних умов кавітації може бути доцільно обирати менший діаметр діафрагми або коригувати інші конструктивні параметри апарата, такі як профіль діафрагми чи довжина робочої зони, щоб створити необхідні умови для утворення паро-газової фази.

Процес утворення паро-газової фази має як позитивні, так і негативні аспекти. З одного боку, кавітація сприяє інтенсифікації фізико-хімічних процесів, таких як диспергування, емульгування або руйнування молекул забруднювачів. Це особливо важливо для таких застосувань, як очищення води, підвищення ефективності хімічних реакцій чи подрібнення частинок у суспензіях. З іншого боку, колапс кавітаційних бульбашок створює значні навантаження на стінки апарата, що може призводити до кавітаційної ерозії, зносу матеріалів та скорочення довговічності обладнання.

Для контролю утворення паро-газової фази та мінімізації негативних наслідків використовуються чисельне моделювання, розрахунки динаміки рідини та оптимізація конструкції апарата. Наприклад, можна коригувати геометрію каналів, діаметри діафрагми чи враховувати матеріали з високою стійкістю до ерозії. Завдяки цьому забезпечується не лише ефективність апарата, але й його довговічність у промислових умовах.

Таким чином, результати симуляцій демонструють, що діаметр діафрагми є ключовим параметром, що впливає на інтенсивність і характер кавітаційних явищ. Зменшення діаметра призводить до посилення кавітації, однак підвищує ризик ерозійного зношування. З іншого боку, збільшення діаметра знижує ефективність кавітаційного процесу, оскільки тиск залишається на вищому рівні і кавітаційні умови не досягаються.

Оптимізація діаметра діафрагми залежить від конкретної задачі: для інтенсифікації кавітаційних процесів необхідно вибирати менші діаметри, але з

урахуванням заходів із захисту від ерозії. Для забезпечення стабільної та довговічної роботи обладнання слід застосовувати оптимальні конструктивні рішення та методи математичного моделювання, які дозволяють мінімізувати небажані ефекти та підвищити ефективність роботи кавітаційного апарата.

4. Розрахунки щодо надійності та довговічності досліджуваного апарата

Надійність і довговічність є ключовими параметрами при проектуванні та експлуатації гідродинамічних кавітаційних апаратів статичного типу. Вони визначають стабільність роботи обладнання в умовах тривалих і складних технологічних процесів, зменшують витрати на технічне обслуговування та ремонти, а також мінімізують ризики аварійних ситуацій. Для оцінки цих характеристик використовуються комплексні інженерні методики, які включають аналіз напружено-деформованого стану (НДС) конструктивних елементів, розрахунки на втомну міцність, врахування впливу кавітаційної ерозії та інших факторів, що спричиняють деградацію матеріалів.

Важливим фактором є вплив кавітаційної ерозії, яка спричиняє поступове руйнування поверхні конструкції. Для оцінки довговічності апарата в умовах інтенсивної кавітації враховуються характеристики матеріалів, які використовуються для виготовлення. Найчастіше застосовуються високоміцні сталі, сплави титану або матеріали зі спеціальними захисними покриттями, що мають високу стійкість до кавітаційних навантажень. Розрахунки проводяться на основі експериментальних даних щодо швидкості зносу матеріалу в умовах кавітації, а також з урахуванням гідродинамічних характеристик, отриманих у ході чисельного моделювання.

Додатково до розрахунків міцності та зносу проводиться оцінка енергоефективності апарата, оскільки підвищення енерговитрат може свідчити про деградацію його елементів. Для цього використовується аналіз продуктивності апарата на різних етапах експлуатації. Результати таких розрахунків дозволяють прогнозувати залишковий ресурс обладнання та планувати його технічне обслуговування або заміну.

На рисунках 4.1.-4.3. показано в яких зонах кавітаційна ерозія проявляється най більше, виконаної за допомогою чисельного моделювання. Червоні та помаранчеві області на моделі позначають зони інтенсивного утворення та колапсу кавітаційних бульбашок. Ці зони, як правило, відповідають місцям підвищеної турбулентності або різкої зміни геометрії потоку, наприклад, у вузьких ділянках, зонах перепадів діаметрів або поблизу стінок апарата.

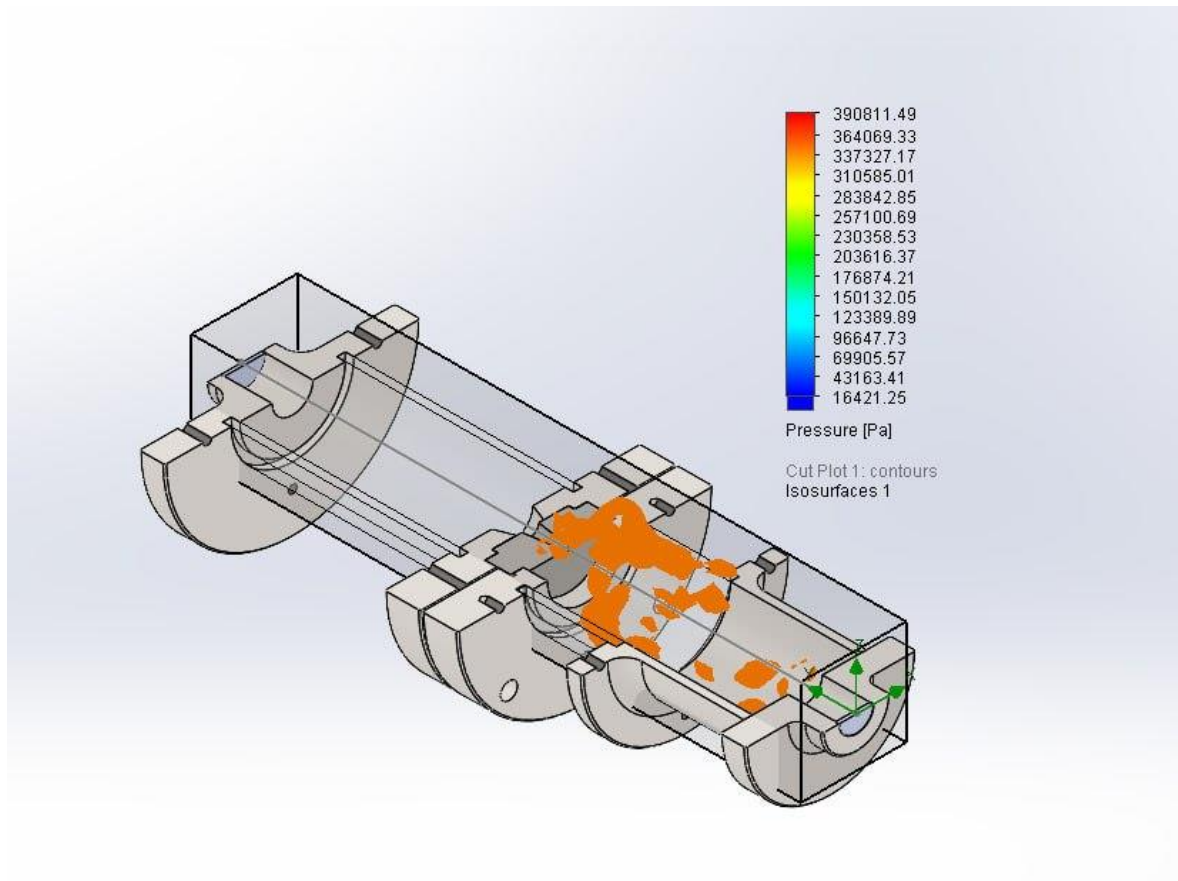


Рис. 4.1. - Результат симуляції потоку рідини вздовж гідродинамічного кавітаційного апарата статичного типу на надійність, для діаметра овора діафрагми 3 мм

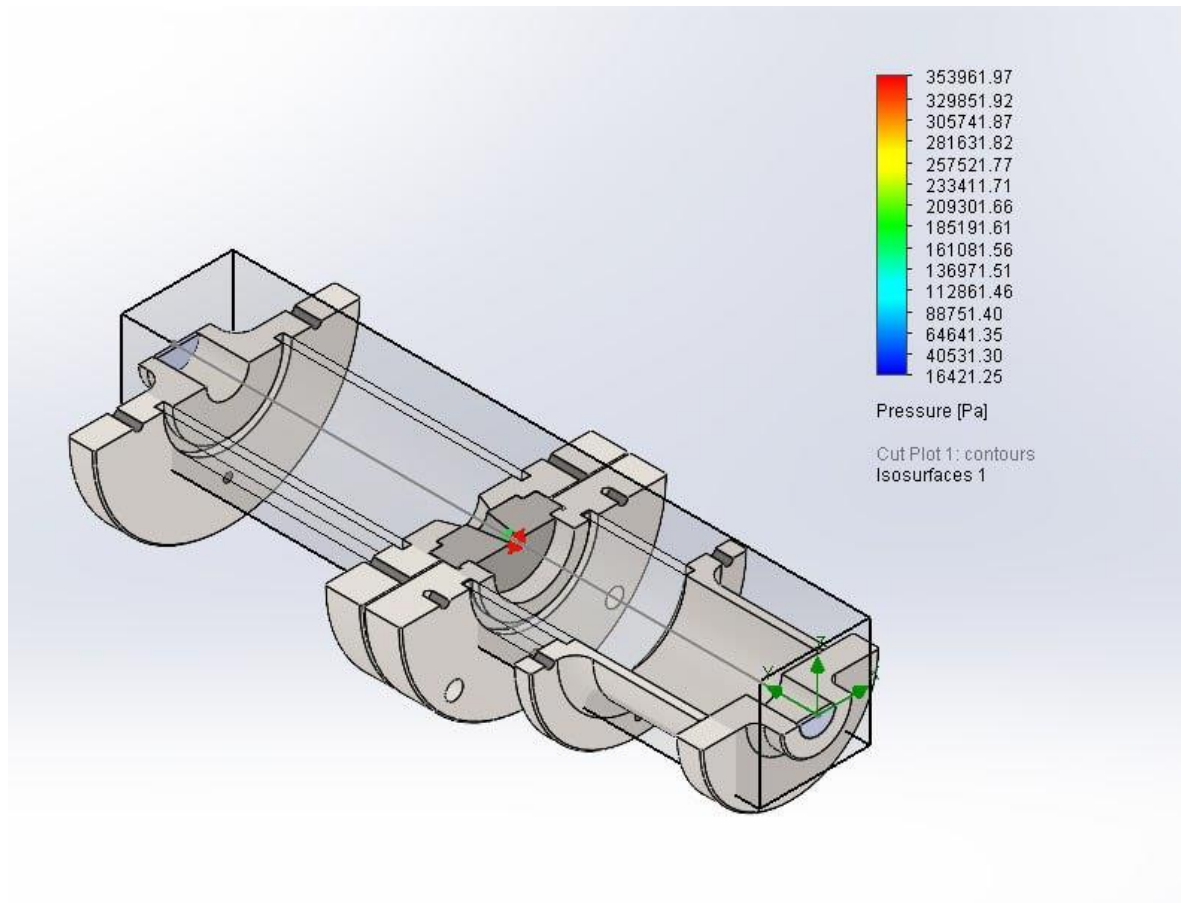


Рис. 4.2. - Результат симуляції потоку рідини вздовж гідродинамічного кавітаційного апарата статичного типу на надійність, для діаметра овора діафрагми 5 мм

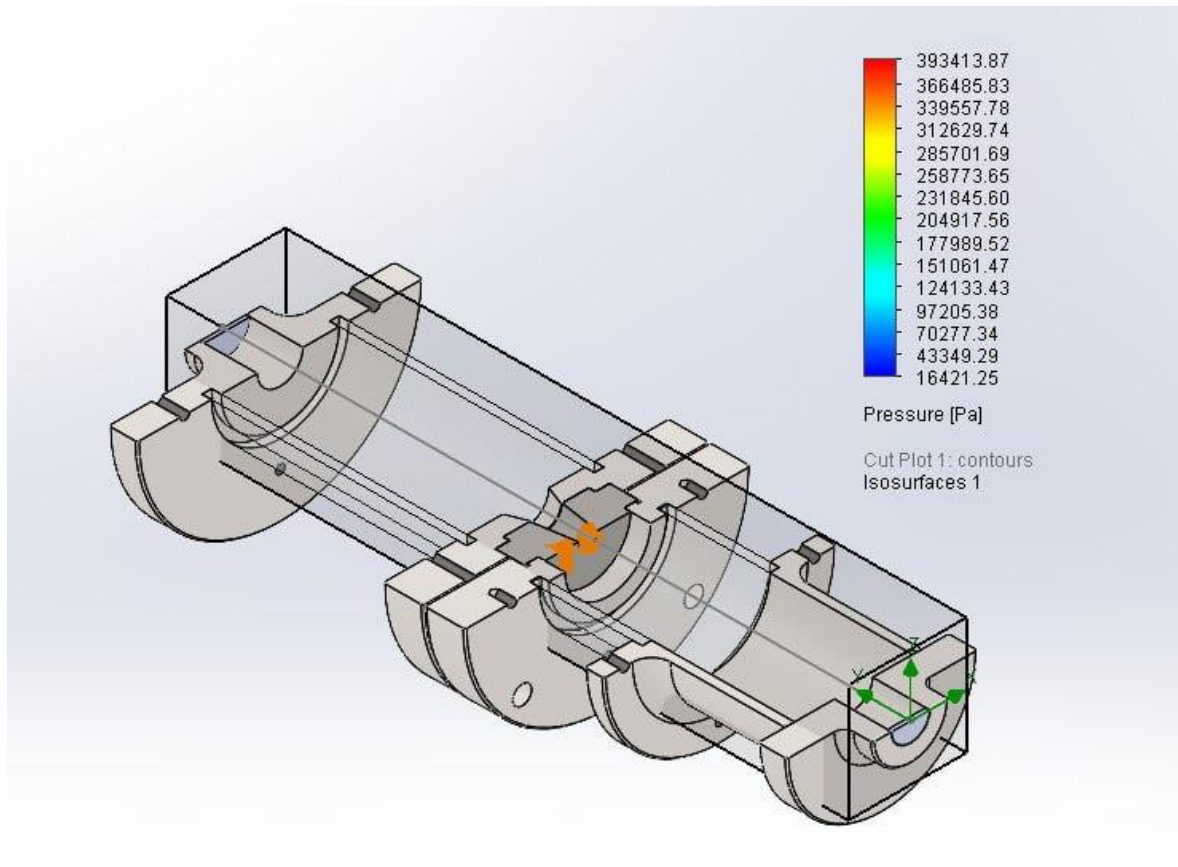


Рис. 4.3. - Результат симуляції потоку рідини вздовж гідродинамічного кавітаційного апарата статичного типу на надійність, для діаметра овора діафрагми 8 мм

Такі області є критичними з точки зору кавітаційної ерозії, оскільки постійне утворення та руйнування бульбашок створює локальні ударні навантаження на поверхню матеріалу, що з часом може спричинити пошкодження або знос конструкції. У цьому випадку модель дозволяє чітко визначити проблемні ділянки, які потребують додаткового захисту або оптимізації геометрії апарата для зниження впливу кавітаційних явищ. Отримані дані також можуть бути використані для вибору відповідних матеріалів з підвищеною стійкістю до кавітаційної ерозії або для модифікації потоку, наприклад, через зміну діаметра чи форми діафрагми. Таким чином, симуляція

наочно демонструє важливість врахування кавітаційних процесів при проектуванні подібного обладнання.

Таким чином, забезпечення надійності та довговічності гідродинамічного кавітаційного апарата вимагає комплексного підходу, що включає чисельне моделювання, вибір оптимальних конструкційних матеріалів, аналіз напружено-деформованого стану та оцінку стійкості до втомного руйнування і кавітаційної ерозії. Розроблені методики та результати розрахунків сприяють створенню обладнання, яке забезпечує тривалу, безпечну та ефективну експлуатацію в умовах промислових технологічних процесів.

4.1. Основні заходи для підвищення надійності та довговічності

У результаті проведеного дослідження було виявлено, що кавітаційний гідродинамічний апарат статичного типу, зокрема, має кілька важливих особливостей, що потребують уваги та регулярного обслуговування. Однією з основних проблем, що виникають в процесі експлуатації такого обладнання, є необхідність постійної заміни діафрагма та скляних труб. Це зумовлено руйнуванням стінок труб внаслідок явища кавітації, що є неминучим при тривалій роботі апарата.

Кавітація — це фізичний процес, який відбувається, коли місцевий тиск в рідині падає до рівня, нижчого за її парціальний тиск, що призводить до утворення парових бульбашок. Коли ці бульбашки потім скупчуються в більш високому тиску, вони швидко колапсують, викликаючи сильні удари, що можуть пошкодити матеріали, з яких виготовлені компоненти апарата. Це явище особливо агресивне для таких частин, як діафрагма і скляні трубки, оскільки в цих елементах створюється найбільший перепад тиску і, відповідно, максимальний ризик кавітації.

Діафрагма, який є частиною кавітаційного апарата, відіграє важливу роль у зміні швидкості потоку рідини. Поступово зменшуючи перетин потоку, діафрагма спричиняє підвищення швидкості рідини і відповідно зниження її тиску. Якщо цей елемент не обслуговується належним чином і не замінюється вчасно, його здатність ефективно виконувати свою функцію знижується через зношення матеріалів, що призводить до подальшого руйнування труб.

Ще однією важливою складовою є скляні трубки, які в деяких моделях використовуються для моніторингу і контролю за процесом кавітації. Через свої властивості, скло здатне витримувати високі навантаження, однак у разі тривалої експлуатації під впливом постійних ударів від кавітаційних бульбашок воно починає тріскатися та руйнуватися. Особливо це стосується трубок, які перебувають безпосередньо у зоні інтенсивної кавітації. Оскільки руйнування цих елементів може призвести до небезпечних наслідків, таких як витік рідини

чи порушення роботи апарата, регулярна заміна цих частин є обов'язковою для забезпечення безпеки та ефективності роботи апарата.

Розуміння того, що кавітація є природним явищем у роботі подібних апаратів, допомагає розробити стратегії для зменшення її негативного впливу. Наприклад, одним із шляхів є використання спеціальних матеріалів, що краще витримують удари та ерозію, що спричиняються кавітацією. Проте, навіть найсучасніші матеріали не можуть повністю усунути руйнівний ефект кавітації, тому необхідність регулярного технічного обслуговування та заміни окремих компонентів залишається.

Також варто зазначити, що дослідження показали важливість контролю за умовами експлуатації апарата. Надмірні навантаження на апарат, які виникають при неправильному налаштуванні параметрів, таких як швидкість потоку чи температура рідини, можуть сприяти посиленню явища кавітації і прискоренню руйнування компонентів. Тому важливо проводити регулярні перевірки та налаштування обладнання, щоб зберегти його працездатність на довший час.

Крім того, виявлено, що вплив кавітаційних процесів на матеріали може бути не тільки фізичним, а й хімічним. В умовах високих швидкостей і температур може відбуватися реакція між матеріалом труб і самою рідиною, що також веде до деградації матеріалу. Це ще більше ускладнює задачу забезпечення довговічності апарата, оскільки тут мають значення не тільки механічні властивості матеріалів, а й їх хімічна стійкість.

Заміна діафрагми та скляних труб, хоча і є вимушеним заходом, є необхідною частиною технічного обслуговування. Вона дозволяє уникнути серйозних поломок і забезпечує безперебійну роботу гідродинамічного апарата. Проте для досягнення максимальної ефективності та зменшення витрат на заміну цих елементів важливо розробити систему попередження та моніторингу стану обладнання. Регулярні інспекції, використання датчиків для контролю за тиском і швидкістю потоку рідини дозволяють своєчасно виявити проблеми і запобігти серйозним пошкодженням.

Таким чином, кавітація є важливим фактором, що впливає на ефективність і довговічність кавітаційного гідродинамічного апарата. Проблема руйнування діафрагма і скляних труб внаслідок цього явища вимагає постійної уваги до стану апарата та регулярного обслуговування. Це забезпечить не тільки безпеку експлуатації, але й продовжить термін служби обладнання, знижуючи витрати на його ремонт та заміну компонентів.

5. Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.

Охорона праці є невід'ємною складовою будь-якої виробничої діяльності, зокрема під час експлуатації гідродинамічних кавітаційних апаратів статичного типу. Безпечні умови праці дозволяють забезпечити збереження здоров'я працівників, оптимізувати процеси експлуатації обладнання та мінімізувати ризики виникнення аварій чи надзвичайних ситуацій. Удосконалення конструкції апарата на основі чисельного моделювання потребує одночасного врахування технічних та організаційних заходів з охорони праці для безпечної експлуатації обладнання. Основними завданнями охорони праці є усунення небезпечних та шкідливих факторів, розробка заходів для безаварійної роботи системи та забезпечення готовності персоналу до надзвичайних ситуацій.

Ідентифікація небезпек та ризиків при експлуатації кавітаційного обладнання

При роботі гідродинамічного кавітаційного апарата можуть виникати різні небезпечні ситуації, що впливають на безпеку персоналу та цілісність обладнання. Основні небезпеки включають:

- Гідравлічний удар. Це явище може виникати при різкому зменшенні або збільшенні потоку рідини, що призводить до миттєвого підвищення тиску у системі. Гідравлічний удар може спричинити пошкодження конструктивних елементів апарата та трубопроводу.

- Кавітаційна ерозія. Тривала робота апарата у режимі інтенсивної кавітації може призвести до руйнування стінок апарата та інших конструктивних елементів, що знижує його надійність і створює загрозу для працівників.

- Надмірний шум та вібрація. Кавітаційні процеси супроводжуються інтенсивними шумами та вібраціями, що негативно впливають на працівників і можуть призвести до професійних захворювань.

- Розгерметизація обладнання. У випадку пошкодження конструктивних елементів можливий витік рідин або утворення небезпечних ситуацій, що загрожують безпеці персоналу.

Організація охорони праці при експлуатації гідродинамічних апаратів
Для безпечної експлуатації обладнання необхідно дотримуватися комплексу організаційних та технічних заходів.

1) Вимоги до технічного стану обладнання:

- Регулярна перевірка робочих параметрів, таких як тиск, температура та швидкість потоку.
- Своєчасне обслуговування та діагностика обладнання для запобігання аварійним ситуаціям.
- Використання сучасних датчиків для контролю стану апарата та системи трубопроводів.

2) Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ):

- Захист органів слуху від шуму (спеціальні навушники або беруші).
- Захисні рукавиці та окуляри для обслуговуючого персоналу.
- Використання спеціального одягу, стійкого до дії рідин або хімічних речовин.

3) Організація робочого місця:

- Обладнання приміщення системами вентиляції для забезпечення нормальних санітарно-гігієнічних умов.
- Забезпечення достатнього освітлення робочої зони для підвищення безпеки операцій.
- Розташування обладнання таким чином, щоб унеможливити контактування працівників з рухомими частинами апарата.

Техніка безпеки у надзвичайних ситуаціях

Під час експлуатації гідродинамічного кавітаційного апарата можливе виникнення надзвичайних ситуацій, таких як розрив апарата через надмірний тиск, витік небезпечних рідин або гідравлічний удар. Для зменшення наслідків подібних ситуацій необхідно дотримуватися таких заходів:

1) Дії у разі аварійного підвищення тиску:

- Автоматичне спрацювання запобіжних клапанів для скидання надлишкового тиску.

- Негайне відключення апарата та блокування системи живлення.
- Евакуація персоналу з небезпечної зони.

2) Заходи при витоках рідин:

- Визначення та ізоляція місця витоку.
- Застосування сорбентів для ліквідації розливу рідини.
- Використання засобів індивідуального захисту для безпечного усунення наслідків аварії.

3) Дії при гідравлічному ударі:

- Використання захисних пристроїв, таких як гідравлічні демпфери.
- Швидке виявлення та усунення причини удару (різке закриття клапанів або збої у роботі насосів).

Пожежна безпека є важливим аспектом при роботі обладнання, що працює з рідинами, особливо якщо вони можуть мати підвищену температурну чутливість. Основні заходи включають:

- Обладнання приміщення первинними засобами пожежогасіння (вогнегасники, пожежні щити).
- Забезпечення автоматичної пожежної сигналізації.
- Використання негорючих матеріалів для конструктивних елементів апарата та трубопроводів.

Заходи для зниження шуму та вібрації

Оскільки інтенсивна кавітація супроводжується шумами та вібрацією, необхідно впроваджувати такі заходи:

- Застосування антивібраційних основ для монтажу обладнання.
- Ізоляція джерел шуму спеціальними кожухами або акустичними екранами.
- Регулярний контроль та балансування насосів для зменшення коливань потоку.

Забезпечення охорони праці та безпеки при експлуатації гідродинамічних кавітаційних апаратів є важливим етапом проектування та впровадження обладнання. Дотримання технічних вимог, використання сучасних систем

контролю, впровадження індивідуальних засобів захисту та розробка ефективних заходів у випадках надзвичайних ситуацій дозволяють мінімізувати ризики для здоров'я персоналу та запобігти аваріям. Комплексний підхід до охорони праці забезпечує не тільки безпеку працівників, але й підвищує ефективність роботи обладнання та сприяє його довговічності. Для досягнення цього важливо проводити регулярні інструктажі з техніки безпеки, навчання персоналу правильній експлуатації обладнання та дотриманню робочих процедур. Крім того, необхідно забезпечувати своєчасне технічне обслуговування апарата, що включає перевірку стану його елементів на наявність зношування або пошкоджень. Це дозволяє знизити ймовірність виникнення небезпечних ситуацій та гарантує стабільну й ефективну роботу технологічного процесу.

5.1.Заходи з охорони праці.

Охорона праці є комплексом правових, соціально-економічних, організаційно-технічних, санітарно-гігієнічних та лікувально-профілактичних заходів, спрямованих на забезпечення безпеки, збереження життя та здоров'я працівників під час трудової діяльності. Впровадження заходів з охорони праці є обов'язковою умовою ефективної та безпечної роботи будь-якого обладнання, включаючи гідродинамічні кавітаційні апарати статичного типу. Використання такого обладнання супроводжується підвищеними ризиками, пов'язаними з гідравлічними ударами, кавітаційною ерозією, надмірним шумом та вібрацією, що вимагає належної організації охорони праці та контролю за дотриманням безпеки.

Організаційні заходи є першочерговими для створення безпечних умов праці, оскільки вони передбачають впровадження регламентованих норм та правил на підприємстві

Технічні заходи спрямовані на забезпечення безпечної роботи обладнання шляхом його вдосконалення, контролю робочих параметрів та створення захисних бар'єрів для працівників.

Санітарно-гігієнічні умови праці мають забезпечити мінімізацію шкідливих впливів на здоров'я працівників.

Пожежна безпека на підприємствах є невід'ємною частиною охорони праці, особливо у випадках роботи з обладнанням, яке може працювати у небезпечних режимах.

Заходи у разі надзвичайних ситуацій

Виникнення аварійних та надзвичайних ситуацій може становити серйозну загрозу як для обладнання, так і для здоров'я працівників.

Дотримання заходів з охорони праці є основою безпечної та ефективної експлуатації гідродинамічних кавітаційних апаратів статичного типу. Комплексний підхід, що включає організаційні, технічні, санітарно-гігієнічні заходи та дотримання пожежної безпеки, дозволяє мінімізувати ризики для здоров'я працівників, уникнути аварій та підвищити надійність роботи

обладнання. Системний контроль, регулярне навчання персоналу та впровадження сучасних технологій забезпечують створення безпечних умов праці та ефективне функціонування обладнання у промисловості.

5.2.Заходи з безпеки в надзвичайних ситуаціях.

Безпека в надзвичайних ситуаціях є одним із найважливіших напрямів забезпечення життєдіяльності людей на підприємствах, в установах і загалом у будь-якому середовищі. Надзвичайні ситуації можуть виникати в результаті природних катастроф, техногенних аварій, соціальних конфліктів або інших непередбачених обставин. Ефективність заходів безпеки в надзвичайних ситуаціях залежить від своєчасної підготовки, вміння організовано діяти в критичних умовах, а також від готовності відповідних служб і персоналу до мінімізації ризиків та наслідків можливих подій.

Першочерговими заходами є своєчасне виявлення та попередження надзвичайних ситуацій, що потребує розробки системи моніторингу та контролю за потенційно небезпечними об'єктами та процесами. Особливу увагу слід приділити об'єктам із підвищеною небезпекою, таким як хімічні підприємства, гідротехнічні споруди, транспортні вузли, енергетичні установки та інші об'єкти критичної інфраструктури. У таких випадках важливо організувати постійний моніторинг технічного стану обладнання, навколишнього середовища та параметрів роботи, що можуть призвести до аварій. Для цього застосовуються автоматизовані системи оповіщення та контролю, які здатні оперативно інформувати персонал та відповідні служби про загрозу.

Завчасна підготовка та планування дій у разі виникнення надзвичайної ситуації є необхідною складовою для забезпечення безпеки. Кожне підприємство або організація повинні мати розроблені плани евакуації персоналу, заходи ліквідації аварійних ситуацій та методики мінімізації збитків. Ці плани включають чіткий алгоритм дій, розподіл обов'язків між працівниками, а також визначення маршрутів евакуації та розташування місць збору у безпечних зонах. Обов'язково проводяться тренування та навчання серед працівників, щоб відпрацювати навички швидкого реагування у випадку реальної загрози.

Засоби індивідуального та колективного захисту є важливим компонентом безпеки в надзвичайних ситуаціях. До засобів індивідуального захисту належать протигази, респіратори, захисний спецодяг, каски, рукавиці, взуття, що дозволяє

мінімізувати вплив шкідливих факторів на організм людини. Колективний захист передбачає використання захисних споруд, укриттів, спеціальних фільтрувальних систем для очищення повітря, систем вентиляції, а також аварійного освітлення та засобів зв'язку. У разі загрози хімічного забруднення або радіаційної небезпеки необхідно оперативно інформувати персонал про необхідність використання відповідних захисних засобів.

Оповіщення та комунікація є ключовим елементом забезпечення безпеки під час надзвичайних ситуацій. Для цього на підприємствах впроваджуються системи раннього сповіщення, які можуть включати сирени, гучномовці, світлові сигнали та інші засоби інформування. Паралельно використовується мобільний та стаціонарний зв'язок для оперативного передавання інформації про небезпеку та координації дій усіх підрозділів. Ефективна комунікація дозволяє уникнути паніки серед працівників та забезпечити впорядковану евакуацію чи ліквідацію наслідків події.

Ліквідація надзвичайних ситуацій є однією з основних стадій реагування. Вона включає в себе дії, спрямовані на усунення або нейтралізацію загрози, захист життя і здоров'я людей, а також відновлення нормального функціонування об'єкта. У процесі ліквідації важливою є координація між усіма аварійно-рятувальними службами, медичними працівниками та адміністрацією підприємства. Працівники, які беруть участь у ліквідації аварії, повинні мати необхідні знання, засоби захисту та обладнання для проведення робіт у складних умовах.

Особливу увагу слід приділяти навчальній підготовці працівників. Регулярне проведення тренувань, навчань та інструктажів забезпечує готовність персоналу до оперативного реагування на надзвичайні ситуації. У процесі навчання відпрацьовуються сценарії виникнення пожеж, вибухів, хімічних викидів, затоплень та інших подій. Працівники повинні чітко знати свої обов'язки, маршрути евакуації та правила користування засобами захисту. Такі тренування дозволяють мінімізувати час реагування, що є критично важливим для збереження життя людей.

Після ліквідації надзвичайної ситуації важливим етапом є проведення аналізу причин її виникнення та розробка заходів для запобігання подібним подіям у майбутньому. Це включає перевірку технічного стану обладнання, оцінку ефективності вжитих заходів та внесення коригувань до планів реагування. Запобіжні заходи, засновані на досвіді минулих подій, дозволяють удосконалити систему безпеки та забезпечити надійний захист працівників та підприємства.

Таким чином, заходи з безпеки в надзвичайних ситуаціях є комплексом дій, що охоплюють попередження загроз, підготовку до їх виникнення, оперативне реагування та ліквідацію наслідків. Впровадження ефективної системи безпеки на підприємстві дозволяє зберегти життя та здоров'я працівників, мінімізувати збитки для виробництва та забезпечити стабільність роботи в умовах непередбачуваних обставин.

5.3. Захист при кавітаційних явищах на підприємстві.

Кавітаційні явища, які виникають у промисловому обладнанні під час роботи з рідинами, є одним з основних факторів, що призводять до зносу конструктивних елементів, зниження ефективності роботи обладнання, а також можуть становити загрозу для безпеки працівників. Кавітація — це процес утворення, росту та руйнування бульбашок або порожнин у рідині, коли локальний тиск падає нижче тиску насиченої пари рідини. При цьому мікрровибухи, що виникають під час колапсу кавітаційних бульбашок, супроводжуються сильними ударними хвилями, які спричиняють руйнування поверхонь, шум, вібрацію та інші небезпечні ефекти. Захист обладнання та працівників від негативних наслідків кавітації є важливою складовою охорони праці на підприємстві.

Перш за все, для запобігання кавітації та мінімізації її наслідків необхідно забезпечити правильне проектування гідравлічних систем та обладнання. Основним фактором, що сприяє виникненню кавітації, є різке зниження тиску у певних ділянках потоку рідини. Для уникнення цього під час проектування слід дотримуватися гідродинамічних розрахунків та забезпечити плавність зміни швидкості і тиску рідини у робочих каналах апарату. Особливу увагу слід приділити вибору діаметрів сопел та діафрагм, а також оптимізації форми проточних частин обладнання, оскільки різкі зміни геометрії можуть створювати умови для локальних падінь тиску, що призводять до кавітації.

Важливим заходом захисту є використання матеріалів, стійких до кавітаційної ерозії. Найбільших руйнувань зазнають ті поверхні, які безпосередньо контактують із рідиною у зонах кавітації. Тому у промисловому обладнанні використовують спеціальні високоміцні та зносостійкі матеріали, такі як нержавіюча сталь, титанові сплави, а також композити з високою опірністю ударним навантаженням. Крім того, ефективними є спеціальні захисні покриття, що наносяться на поверхні проточних частин для підвищення їх стійкості до впливу кавітації. Такі покриття можуть бути виконані з карбідів,

керамічних матеріалів або полімерів, що забезпечують зменшення швидкості руйнування конструкцій у результаті дії ударних хвиль.

Серед заходів, спрямованих на зменшення кавітації, важливе місце займає контроль робочих параметрів рідини, зокрема тиску та температури. Регулювання цих параметрів дозволяє підтримувати умови, за яких ймовірність утворення кавітаційних бульбашок мінімізується. Наприклад, підвищення тиску у системі або зниження температури рідини дозволяє уникати досягнення умов насичення пари, при яких виникає кавітація. Системи моніторингу та автоматичного контролю робочих параметрів є ефективним засобом для вчасного виявлення небезпечних режимів роботи обладнання та запобігання розвитку кавітаційних процесів.

Шум та вібрація, що супроводжують кавітаційні явища, також становлять серйозну проблему, оскільки вони можуть призводити до погіршення умов праці на підприємстві та негативно впливати на здоров'я працівників. Для зниження рівня шуму застосовуються шумопоглинаючі матеріали та акустичні екрани, які ізолюють джерела кавітаційного шуму. Вібрація може бути зменшена шляхом використання антивібраційних кріплень, балансування обладнання та регулярної перевірки його технічного стану. У поєднанні з правильним монтажем гідравлічних систем ці заходи дозволяють суттєво покращити умови праці та знизити шкідливі впливи на персонал.

Необхідно також впроваджувати регулярний технічний огляд та обслуговування обладнання. Кавітаційні процеси мають кумулятивний ефект, тобто руйнування конструкцій відбувається поступово, але постійно. Регулярні перевірки поверхонь на наявність слідів ерозії та вчасна їх заміна або ремонт дозволяють уникнути аварійних ситуацій та зупинок виробництва. У цьому контексті важливим є застосування методів неруйнівного контролю, таких як ультразвуковий та візуальний огляд, які дозволяють виявляти дефекти на ранніх стадіях їх розвитку.

В умовах підприємства необхідно також навчати працівників правилам безпечної роботи з обладнанням, у якому можуть виникати кавітаційні процеси.

Важливо проводити інструктажі, навчальні тренування та перевірку знань персоналу щодо дій у випадку аварійних ситуацій, спричинених кавітацією. Працівники повинні бути ознайомлені з правилами користування засобами індивідуального захисту, такими як протишумові навушники, антивібраційні рукавиці та захисний спецодяг, що знижує шкідливий вплив на здоров'я людини.

Захист від кавітації на підприємстві є багатогранним завданням, що потребує комплексного підходу. Поєднання правильного проектування обладнання, використання сучасних матеріалів, контролю робочих параметрів та забезпечення безпеки працівників дозволяє мінімізувати негативний вплив кавітаційних процесів на виробництво. Систематичне впровадження заходів з охорони праці та регулярний контроль стану обладнання забезпечують стабільну та безпечну роботу підприємства у довгостроковій перспективі.

Висновки

У результаті виконаної кваліфікаційної роботи було запропоновано удосконалення конструкції гідродинамічного кавітаційного апарата статичного типу на основі чисельного моделювання із використанням програмного забезпечення SolidWorks. Моделювання дозволило провести детальний аналіз конструктивних параметрів апарата та впливу геометрії отвору в діафрагмі на інтенсивність кавітаційних явищ. На основі отриманих результатів можна зробити наступні висновки:

1. Конфігурація та розміри отвору у діафрагмі впливає на гідродинамічні параметр в кавітаційному апараті і відповідно на умови виникнення кавітації та її інтенсивність.

2. Особливий вплив має вихідний/вхідний діаметри конусного отвору. Зокрема, найінтенсивніша кавітація спостерігається за вхідного діаметру 3 мм. Водночас це створює найбільший перепад тиску і збільшує енергоспоживання. Найменші швидкості спостерігаються за вхідного діаметру отвору 5мм, водночас і гідродинамічний опір падає. Тому ту чи іншу діафрагму слід використовувати залежно від поставленого завдання. Наприклад для гомогенізації слід використовувати діафрагму з меншим отвором, а для змішування з більшим.

3. Чисельне моделювання дозволило визначити раціональну геометрію отвору в діафрагмі для забезпечення максимального кавітаційного ефекту з урахуванням енергетичних витрат і довговічності обладнання.

4. Використання програмного забезпечення SolidWorks забезпечило можливість точної візуалізації та аналізу гідродинаміки апарата та проаналізувати розподіл тиску та швидкості рідини у різних ділянках апарата, об'єми парогазової фракції; визначити критичні зони, де виникають інтенсивні кавітаційні процеси.

5. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення конструкції гідродинамічних кавітаційних апаратів, що застосовуються у різних галузях промисловості, таких як:
харчова промисловість – для гомогенізації, стерилізації та екстракції;

хімічна промисловість – для прискорення хімічних реакцій та диспергування;
енергетика – для обробки палива та очищення теплообмінного обладнання;
очищення води – для знищення забруднень та знезараження.

Перелік використаної літератури

1. Liu Y., Li B. Numerical Investigation of the Cavitation Characteristics in Venturi Tubes: The Role of Converging and Diverging Sections. *Applied Sciences*. 2023. Vol. 13, no. 13. P. 7476. URL: <https://doi.org/10.3390/app13137476>
2. Carpenter, J.; Badve, M.; Rajoriya, S.; George, S.; Saharan, V.K.; Pandit, A.B. Hydrodynamic cavitation: An emerging technology for the intensification of various chemical and physical processes in a chemical process industry. *Rev. Chem. Eng.* **2017**, *33*, 433–468.
3. Sarvothaman, V.P.; Simpson, A.; Ranade, V.V. Comparison of Hydrodynamic Cavitation Devices based on Linear and Swirling Flows: Degradation of dichloroaniline in water. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2020**, *59*, 13841–13847.
4. Gogate, P.R.; Pandit, A.B. Hydrodynamic Cavitation Reactors: A state of the art review. *Rev. Chem. Eng.* **2001**, *17*, 1–85.
5. Rajoriya, S.; Bargole, S.; George, S.; Saharan, V.K. Treatment of textile dyeing industry effluent using hydrodynamic cavitation in combination with advanced oxidation reagents. *J. Hazard. Mater.* **2018**, *344*, 1109–1115.
6. Wang, C.; Jin, R.; He, Z.; Qiao, Y.; Wang, Y.; Wang, K.; Lu, Y.; Wang, X.; Liu, D. A new water treatment technology for degradation of B[a]A by Hydrodynamic Cavitation and Chlorine Dioxide Oxidation. *Ultrason. Sonochem.* **2020**, *61*, 104834.
7. Abbas-Shiroodi, Z.; Sadeghi, M.T.; Baradaran, S. Design and optimization of a cavitating device for Congo red decolorization: Experimental investigation and CFD simulation. *Ultrason. Sonochem.* **2021**, *71*, 105386.
8. Innocenzi, V.; Prisciandaro, M.; Vegliò, F. Study of the effect of operative conditions on the decolourization of azo dye solutions by using hydrodynamic cavitation at the lab scale. *Can. J. Chem. Eng.* **2020**, *98*, 1980–1988.
9. Use of hydrodynamic cavitation in (waste)water treatment / M. Dular et al. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2016. Vol. 29. P. 577–588.
10. Д.О. Вітенько, Т.М. Вітенько. АНАЛІЗ ТА ПОРІВНЯННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ПОТОКУ У КАВІТАЦІЙНИХ АПАРАТАХ. *Науковий вісник*

URL: <https://oj.tsatu.edu.ua/index.php/visnik/article/view/815/772>.

11. Horodyskyi N. I., Vitenko T. M. Hydrodynamics in cavitation device under tangential supply fluid. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2018. Vol. 82, no. 1. P. 107–115. URL: <https://doi.org/10.20535/2521-1943.2018.82.128285>.

12. Вітенько Т. М., Гуцал О. Особливості використання кавітаційної техніки в процесах очистки промислових стоків від органічних забруднень. *SumDU Repository*. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/10934>.

13. Ворощук В.Я., Вітенько Т.М. Інжиніринг та 3D моделювання в середовищі SolidWorks: навч. посіб. Тернопіль:ФОП Паляниця В.А., 2023. 164 с.

14. Maddikeri, G.L.; Gogate, P.R.; Pandit, A.B. Intensified synthesis of biodiesel using hydrodynamic cavitation reactors based on the interesterification of waste cooking oil. *Fuel* **2014**, *237*, 285–292.

15. Hwang, H.J.; Park, J.; Min, J.K. A numerical study on the flow control characteristic of a cavitating Venturi with one- and two-stage diffusers. *J. Mech. Sci. Technol.* **2021**, *35*, 1463–1472.

16. Ashrafizadeh, S.M.; Ghassemi, H. Experimental and numerical investigation on the performance of small-sized cavitating Venturis. *Flow Meas. Instrum.* **2015**, *42*, 6–15.

17. Dastane, G.G.; Thakkar, H.; Shah, R.; Perala, S.; Raut, J.; Pandit, A.B. Single and multiphase CFD simulations for designing cavitating Venturi. *Chem. Eng. Res. Des.* **2019**, *149*, 1–12.

18. Ramisetty, K.A.; Pandit, A.B.; Gogate, P.R. Novel Approach of Producing Oil in Water Emulsion Using Hydrodynamic Cavitation Reactor. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2014**, *53*, 16508–16515.

19. Zhao, L.; Sun, L.C.; Mo, Z.Y.; Du, M.; Huang, J.; Bao, J.J.; Tang, J.G.; Xie, G. Effects of the divergent angle on bubble transportation in a rectangular Venturi channel and its performance in producing fine bubbles. *Int. J. Multiphase Flow.* **2019**, *114*, 192–206.

20. Sato, K.; Hachino, K.; Saito, Y. Inception and Dynamics of Traveling-Bubble-Type Cavitation in a Venturi. *Nippon. Kikai Gakkai Ronbunshu B Hen* **2004**, *70*, 69–76.