

Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет
Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій
Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»

АВТОМАТИЗОВАНИЙ РОЗРАХУНОК КАВІТАЦІЙНОГО ЗАПАСУ
НАСОСА ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ

AUTOMATED CALCULATION OF PUMP CAVITATION MARGIN TO
ENSURE SYSTEM RELIABILITY

Спеціальність 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка

освітня програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Виконав: здобувач вищої освіти
групи АВмз - 21
Дерлюк Станіслав Олегович

(підпис)

Керівник:
к. т. н., доцент
Гуменюк Павло Олександрович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 2025 р.
Гарант освітньої програми:
к.т.н., доцент
Гуменюк П. О.

(підпис)

Луцьк – 2025

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Ступінь вищої освіти: магістр

Галузь знань: 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність: 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Освітня програма: «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

О. Ю. Повстяной

« ___ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ДРУГОГО (МАГІСТЕРСЬКОГО) РІВНЯ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Дерлюка Станіслава Олеговича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: *Автоматизований розрахунок кавітаційного запасу насоса для забезпечення надійності системи*

Керівник роботи: *к.т.н., доцент Гуменюк Павло Олександрович*

затверджені наказом закладу вищої освіти від « 27 » 06 2025 року N 304/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи: « 1 » 12 2025 року

3. Вихідні дані до роботи: *технічні характеристики*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

Теоретичні основи кавітації. Класифікація насосів. Кавітація у насосах. Python в інженерних розрахунках. Оцінка можливості виникнення кавітації в насосах.

Розрахунок кавітаційного запасу насоса. Алгоритм та програмна реалізація розрахунку кавітаційного запасу насоса. Вплив змінних параметрів на кавітаційний запас.

5. Перелік графічного матеріалу :

графічний матеріал виконано у вигляді презентації, яка складається з 13 слайдів

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Гуменюк П. О.		
Розділ 2	Гуменюк П. О.		
Розділ 3	Гуменюк П. О.		
Розділ 4	Гуменюк П. О.		
Розділ 5	Гуменюк П. О.		
Розділ 6	Гуменюк П. О.		
Розділ 7	Гуменюк П. О.		
Розділ 8	Гуменюк П. О.		
Нормоконтроль	Лапченко Ю. С.		
Показник запозичень тексту			
Академічна доброчесність	Федік Л. Ю.		

7. Дата видачі завдання 27.06.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

N з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз проблеми за темою роботи та постановка задач	01.09.2025 р.	
2	Аналіз і вибір напрямків дослідження	10.09.2025 р.	
3	Теоретичне дослідження та практична реалізація	20.09.2025 р.	
4	Опис засобів розробки об'єкта проектування	01.10.2025 р.	
5	Загальні висновки та рекомендації	20.10.2025 р.	
6	Оформлення роботи	10.11.2025 р.	
7	Оформлення презентації	20.11.2025 р.	
8	Здача чистового варіанту кваліфікаційної роботи на кафедру	01.12.2025 р.	

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)Дерлюк С. О.
(прізвище та ініціали)Керівник кваліфікаційної роботи _____
(підпис)Гуменюк П. О.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Дерлюк С. О. Автоматизований розрахунок кавітаційного запасу насоса для забезпечення надійності системи. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка. Луцький національний технічний університет, Луцьк 2025.

Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, восьми розділів, загальних висновків та рекомендацій, переліку використаних джерел та додатків.

У кваліфікаційній роботі виконана розробка програмного забезпечення автоматизації розрахунку кавітаційного запасу насоса для забезпечення надійності системи. Розроблене програмне забезпечення є ефективним інструментом для автоматизації розрахунку кавітаційного запасу насосів. Воно може бути використане для оцінки кавітаційного ризику в насосах, підбору насоса з відповідними характеристиками, створення систем з гарантованою надійністю. Програмне забезпечення може стати одним з компонентів у процесі проектування та експлуатації насосних систем, забезпечуючи певну надійність та ефективність роботи. У подальшому можливо розширити функціонал програми, інтегрувати її з іншими інженерними системами та провести додаткові тестування в реальних умовах для покращення її точності та надійності.

Об'єм графічної частини магістерської роботи складає 13 слайдів. Обсяг пояснювальної записки становить 82 друковані сторінки.

Ключові слова: кавітація, насос, кавітаційний запас, моделювання, алгоритм, Python.

ANNOTATION

Derlyuk S. Automated calculation of pump cavitation margin to ensure system reliability. Manuscript.

Master's qualification work of OP "Automation and computer-integrated technologies" specialty 174 Automation, computer-integrated technologies and robotics. Lutsk National Technical University, Lutsk 2025.

The master's qualification work consists of an introduction, eight chapters, general conclusions and recommendations, a list of references and appendices.

The thesis develops software for automating the calculation of pump cavitation margin to ensure system reliability. The developed software is an effective tool for automating the calculation of pump cavitation margin. It can be used to assess cavitation risk in pumps, select a pump with appropriate characteristics, and create systems with guaranteed reliability. The software can become one of the components in the design and operation of pumping systems, ensuring a certain level of reliability and efficiency. In the future, it will be possible to expand the functionality of the program, integrate it with other engineering systems, and conduct additional testing in real conditions to improve its accuracy and reliability.

The volume of the graphic part of the master's thesis is 13 slides. The volume of the explanatory note is 82 printed pages.

Keywords: cavitation, pump, cavitation margin, modeling, algorithm, Python.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КАВІТАЦІЇ	10
Висновок до розділу 1	13
РОЗДІЛ 2 КЛАСИФІКАЦІЯ НАСОСІВ	14
2.1 Класифікація насосів за різними критеріями	16
2.2 Відцентрові насоси	20
Висновок до розділу 2	25
РОЗДІЛ 3 КАВІТАЦІЯ У НАСОСАХ	26
3.1 Кавітація відцентрового насоса	27
3.2 Проблеми, пов'язані з кавітацією	29
3.3 Моніторинг кавітації відцентрових насосів	31
Висновок до розділу 3	35
РОЗДІЛ 4 PYTHON В ІНЖЕНЕРНИХ РОЗРАХУНКАХ	36
4.1 Особливості Python для інженерних розрахунків	37
4.2 Спеціальні бібліотеки Python для інженерних розрахунків	38
Висновок до розділу 4	41
РОЗДІЛ 5 ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ВИНИКНЕННЯ КАВІТАЦІЇ В НАСОСАХ	42
Висновок до розділу 5	49
РОЗДІЛ 6 РОЗРАХУНОК КАВІТАЦІЙНОГО ЗАПАСУ НАСОСА	51
6.1 Існуючі методи розрахунку кавітаційного запасу	51
6.2 Методика розрахунку кавітаційного запасу насоса	56
Висновок до розділу 6	60
РОЗДІЛ 7 АЛГОРИТМ ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРАХУНКУ КАВІТАЦІЙНОГО ЗАПАСУ НАСОСА	61
7.1 Алгоритм розрахунку кавітаційного запасу (NPSH)	61
7.2 Програмна реалізація розрахунку	64

	7
Висновок до розділу 7	68
РОЗДІЛ 8 ВПЛИВ ЗМІННИХ ПАРАМЕТРІВ НА КАВІТАЦІЙНИЙ ЗАПАС	69
Висновок до розділу 8	74
ВИСНОВКИ	75
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	79
ДОДАТКИ	83

ВСТУП

Насоси є важливими механічними пристроями, які широко використовуються в таких галузях, як сільське господарство, комунальне будівництво, суднобудування та авіація. Зі збільшенням попиту на насоси виробникам необхідно розширити свої можливості в розробці економічно ефективних продуктів.

Особливу увагу привертає розробка методів та засобів забезпечення надійності систем, зокрема, автоматизований розрахунок кавітаційного запасу насоса.

Кавітація виникає внаслідок утворення пари в рідині при певних умовах тиску та температури, що може спричинити пошкодження насоса та інших елементів системи, а також зниження їхньої продуктивності. Кавітаційні пошкодження є однією з основних причин відмов насосів, що може спричинити значні економічні втрати та екологічні проблеми. Тому, забезпечення належного кавітаційного запасу насоса є критично важливим для підвищення його надійності та ефективності роботи насосів та насосних систем.

Актуальність: забезпечення надійності та ефективності роботи насосних систем у сучасних умовах є критично важливою задачею, оскільки вони використовуються в різноманітних галузях від промисловості до комунального господарства. Розробка автоматизованого методу розрахунку кавітаційного запасу насосів є актуальною, оскільки це може сприяти підвищенню надійності та ефективності роботи насосних систем, зменшенню витрат на обслуговування та уникненню аварійних ситуацій.

Метою роботи є розробка автоматизованого методу розрахунку кавітаційного запасу насоса для забезпечення його надійності.

Об'єктом дослідження є процес кавітації в насосах та його вплив на їх надійність та ефективність.

Предметом дослідження є методи розрахунку кавітаційного запасу насоса та їх автоматизація з метою підвищення надійності насосних систем.

Наукова новизна дослідження полягає в розробці методу розрахунку кавітаційного запасу насосів, який може бути автоматизованим та застосовуватися для забезпечення надійності та ефективності роботи насосних систем.

Практична новизна полягає у підвищенні надійності насосних систем у різних галузях промисловості.

У процесі виконання роботи необхідно вирішити такі задачі.

1) Проаналізувати теоретичні основи кавітації, включаючи умови її виникнення.

2) Описати класифікацію насосів та основні типи насосів.

3) Розглянути сучасні підходи до оцінки можливості виникнення кавітації в насосах.

4) Вибрати мову програмування та інструменти для автоматизації розрахунків. Визначити необхідні бібліотеки та програмні засоби для реалізації автоматизованої системи розрахунку.

5) Розробити алгоритм оцінки можливості виникнення кавітації в насосах та виконати його програмну реалізацію.

6) Розглянути методи розрахунку кавітаційного запасу насосів.

7) Розробити алгоритм автоматизованого розрахунку кавітаційного запасу насоса з урахуванням визначених критеріїв та обраних технічних засобів та виконати його програмну реалізацію.

8) Дослідити вплив різних параметрів (таких як об'ємна витрата, температура, тиск) на кавітаційний запас насоса.

Апробація результатів дослідження. Основні результати досліджень відображені у науковій статті Дерлюк С. О., Гуменюк П. О. Оцінка можливості виникнення кавітації в насосах. *Технологічні комплекси*. Луцьк, 2025. Том 17, № 2. С. 26-35.

РОЗДІЛ 1

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КАВІТАЦІЇ

Кавітація описує процес утворення бульбашок в рідині з подальшим колапсом цих бульбашок. Кавітаційні процеси ми спостерігаємо щодня в нашому повсякденному житті. Щоранку, нагріваючи воду для чаю, можна спостерігати кавітацію у вигляді з бульбашок, які видають шум. Звукові імпульси є одним із багатьох енергетичних ефектів кавітації.

Відкриття кавітації було зроблено випадково під час спуску на воду есмінця британського флоту «Daring» у 1893 році. Під час випробувань не вдалося досягти проектної швидкості есмінця, що було викликано процесом формування та руйнування кавітаційних бульбашок. Подальші дослідження продовжилися зусиллями Рейнольдса в 1886 році та роботою Релея в 1917 році [1].

Висока щільність енергії, що створюється на одиницю об'єму речовини при обертанні гвинтів, може спричинити деякі негативні ефекти, включаючи високий рівень шуму (бульбашки, що збиваються), ерозію (руйнування поверхонь) і додаткову вібрацію [2].

Але є і позитивні результати від застосування кавітації. Багато дослідників виявили великий потенціал для впливу на рідкі матеріали для зміни їх фізичних і хімічних властивостей. Виявивши позитивні ефекти кавітації, дослідники застосували їх для реалізації технологічних процесів у різних галузях промисловості, включаючи харчову промисловість [3], очищення стічних вод [4], застосування в біомедицині [5], обробку рідких вуглеводнів для зміни їх реологічних властивостей [6] тощо.

Кавітація описується як процес утворення мікробульбашок пари в рідкому продукті, що підлягає обробці. У загальному випадку процес кавітації можна представити як процес утворення кавітаційних каверн в рідкому середовищі з

подальшим зростанням і згортанням, що призводить до виділення високої щільності енергії.

Загальна картина утворення кавітаційної бульбашки така. У фазі розрідження в рідині утворюється порожнеча, яка заповнюється насиченою рідкою парою. У фазі стиснення порожнина руйнується під дією підвищеного тиску і сил поверхневого натягу.

Значний ефект процесу кавітації зумовлений високою концентрацією енергії, що виділяється під час процесу колапсу в середовищі. У момент колапсу тиск і температура газу досягають значних значень, а за деякими даними це 100 МПа і 1000 °С відповідно. Це явище пояснюється малим об'ємом речовини в момент, коли бульбашка досягає мінімального радіуса перед тим, як зруйнуватися.

Кожна окрема кавітаційна бульбашка може локально створювати високу щільність енергії в деякій одиниці об'єму речовини. Створюючи та підтримуючи стабільну кавітацію в рідкому середовищі, мільйони бульбашок рівномірно розподіляються по всьому об'єму речовини. Вони одночасно утворюються та руйнуються, створюючи локальні області з підвищеною температурою та тиском. Ці локальні області зберігають загальні параметри навколишнього середовища, що дозволяє ініціювати хімічні реакції, які за звичайних умов потребували б значно більше енергії.

Кавітація створюється зміною тиску в рідині, при цьому зміна тиску і розрив рідини можуть бути досягнуті різними способами. У [7] автори виділяють чотири основні типи кавітації, які мають різні фізичні механізми створення:

- акустична кавітація;
- гідродинамічна кавітація;
- оптична кавітація;
- кавітація частинок.

Акустична кавітація – це процес розриву рідини при проходженні через неї акустичних коливань (ультразвуковий сигнал високої амплітуди). Коли рідина

контактує з ультразвуком, порожнина всередині рідини починає вібрувати разом із звуковими хвилями. Коли порожнина проходить цикл стиснення, її внутрішній тиск зростає, тоді як у фазі розрідження її локальний тиск знижується. Утворення, подальше зростання у фазі розрідження та раптовий колапс цих порожнин у фазі стиснення є сутністю акустичної кавітації.

Гідродинамічна кавітація – це процес утворення порожнин або бульбашок у рідині, заповненій паром та газом, під дією локального зниження тиску, спричиненого рідиною, що обтікає тверді тіла. Найпоширенішою конструкцією гідродинамічного кавітаційного генератора є трубка Вентурі. Трубки Вентурі, незважаючи на всю їхню простоту, мають кілька різних конфігурацій (рисунок 1.1), однак загальною рисою принципу роботи є зниження тиску рідини шляхом розміщення звужень на шляху рухомої рідини.

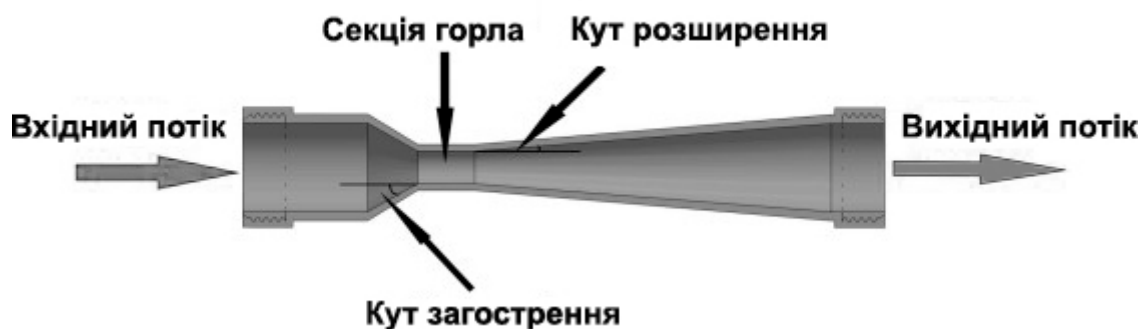


Рисунок 1.1 – Трубка Вентурі [8]

Конусний пристрій, який є основним робочим органом апарату, складається з перегородки з отвором. Рідина під високим тиском рухається до перегородки і, проходячи через отвір, прискорюється. Збільшення швидкості призведе до неминучого збільшення кінетичної енергії та падіння потенційної енергії, представлені тиском. Коли швидкість і тиск досягають певних порогових значень для даного середовища, відбувається бурхливе вивільнення розчиненого газу в рідині, створюючи кавітацію.

Оптична кавітація та кавітація частинок використовуються в основному для експериментальних досліджень для вивчення форм кавітаційних бульбашок. Оптичну кавітацію можна створити або за допомогою коротких лазерних імпульсів, сфокусованих на розчині з низьким коефіцієнтом поглинання, або за допомогою безперервного лазера [9]. Механізм термічної кавітації в цьому випадку полягає в створенні перегрітої області в точці фокусу, що ініціює інтенсивне випаровування рідини. Створені бульбашки, що падають у більш холодну область, згортаються, вивільняючи накопичену енергію.

Висновок до розділу 1

Таким чином кавітація – це фізичне явище, яке характеризується утворенням, зростанням і подальшим колапсом бульбашок у рідині під дією різних зовнішніх впливів. Вона супроводжується значними енергетичними ефектами, такими як підвищення температури і тиску, які можуть призводити до як позитивних, так і негативних наслідків.

Кавітація має широкий спектр застосувань у різних галузях промисловості, таких як харчова промисловість, очищення стічних вод, біомедицина, та обробка рідких вуглеводнів. При цьому вона може мати як корисні ефекти (зміна фізичних і хімічних властивостей рідин, ініціювання хімічних реакцій), так і шкідливі (ерозія поверхонь, додаткова вібрація, високий рівень шуму).

РОЗДІЛ 2

КЛАСИФІКАЦІЯ НАСОСІВ

Підйом води був однією з найдавніших людських потреб і став першим стимулом для винахідливості в галузі енергозабезпечення. Можна припустити, що мистецтво накачування води з'явилося раніше, ніж мистецтво виробництва енергії.

Найдавніші пристрої для підйому води все ще діють в Індії, Єгипті тощо. Типовим прикладом є кошик або черпак, опущений у річку за допомогою балансира, або, пізніше, за допомогою шківів, мотузки та в'ючної тварини.

Певним кроком уперед у механізації перекачування стала розробка підйомного колеса, яке несло на ободі кілька відер, які занурювалися в річку та піднімало воду до зрошувального каналу, при цьому колесо приводилося в рух за допомогою примітивної передачі, яка в свою чергу, рухалась силою тварин або людини.

Пізніший розвиток можна знайти в самохідних колесах, які являють собою комбінацію зовнішнього водяного колеса, що приводиться в рух течією річки, і внутрішнього колеса з ковшами, які піднімають воду з річки до зрошувального каналу. Типові зразки цих коліс можна побачити на Хуанхе в Китаї. Іншими розробками були гвинт Ахімеда, поршневий насос з ручним керуванням і ланцюговий насос.

Поршневий паровий двигун вперше був застосований для відкачування води з шахт. Поршневі насоси та двигуни пізніше були розроблені паралельно з великими потужностями, кульмінацією яких стали насосні двигуни водопровідних станцій потужністю 1000 кВт 1890-х років, деякі з яких використовуються й сьогодні.

У 19 столітті для низьких напорів застосовувалися відцентрові насоси, що приводилися в дію малообертливими двигунами. Як ілюстрація, два

експериментальні канонерські човни, Water Witch і Viper, були оснащені Адміралтейством у 1866 році таким двигуном.

У 1875 році Осборн Рейнольдс виготовив перший турбінний насос, зі значно підвищеною ефективністю.

Винахід парової турбіни та електродвигуна забезпечив високообертову потужність, яка чудово підходила для відцентрового насоса.

Як наслідок, швидкий розвиток відцентрового насоса дозволив йому замінити поршневі насоси для роботи з невеликою кількістю води, крім випадків найвищого тиску. Паралельно з цим були розроблені роторні насоси для малих об'ємів із середнім тиском, особливо для роботи з в'язкими рідинами.

На сьогоднішній час світова промисловість насосів коштує 18 мільярдів доларів, з яких 13 мільярдів доларів витрачається на нові насоси [10]. Середнє зростання цього ринку становить близько 3 %. За оцінками, в галузях, що займаються виробництвом насосів, працює від 250 до 300 тисяч людей, не враховуючи самих користувачів насосів. На рисунку 2.1 показано огляд виробників насосів, а на рисунку 2.2 – розподіл ринку насосів.

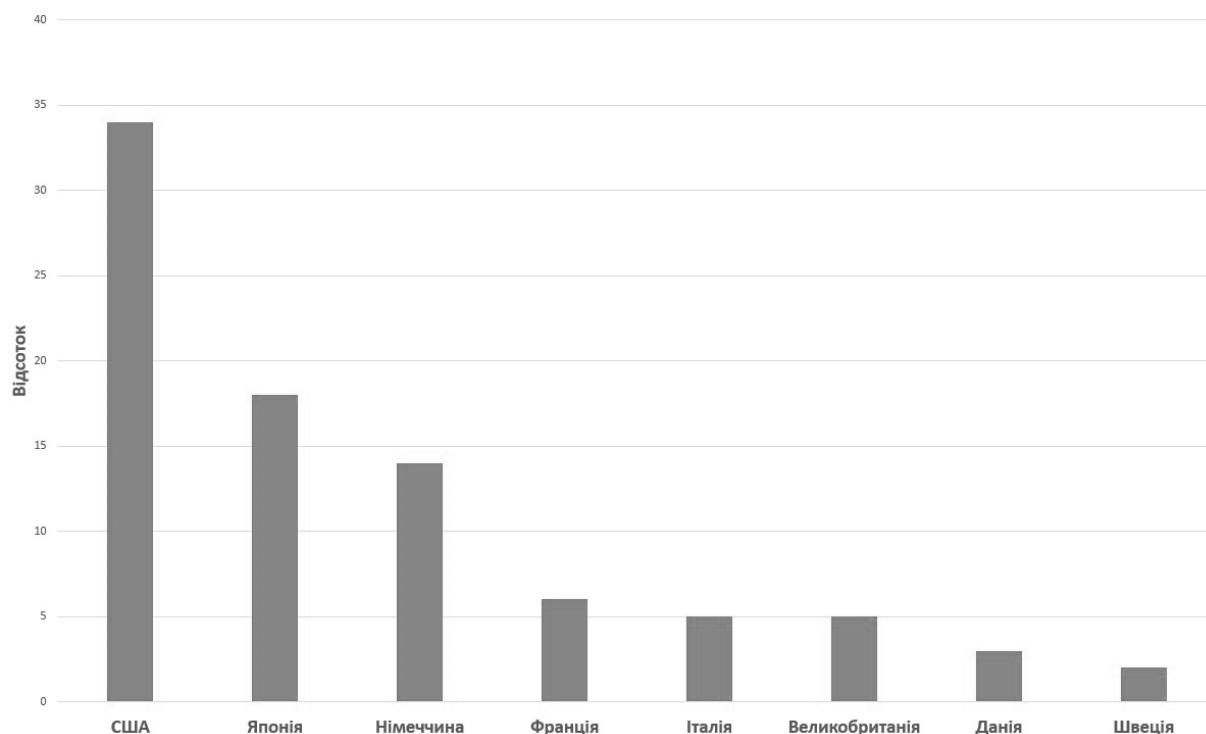


Рисунок 2.1 – Огляд виробників насосів [10]

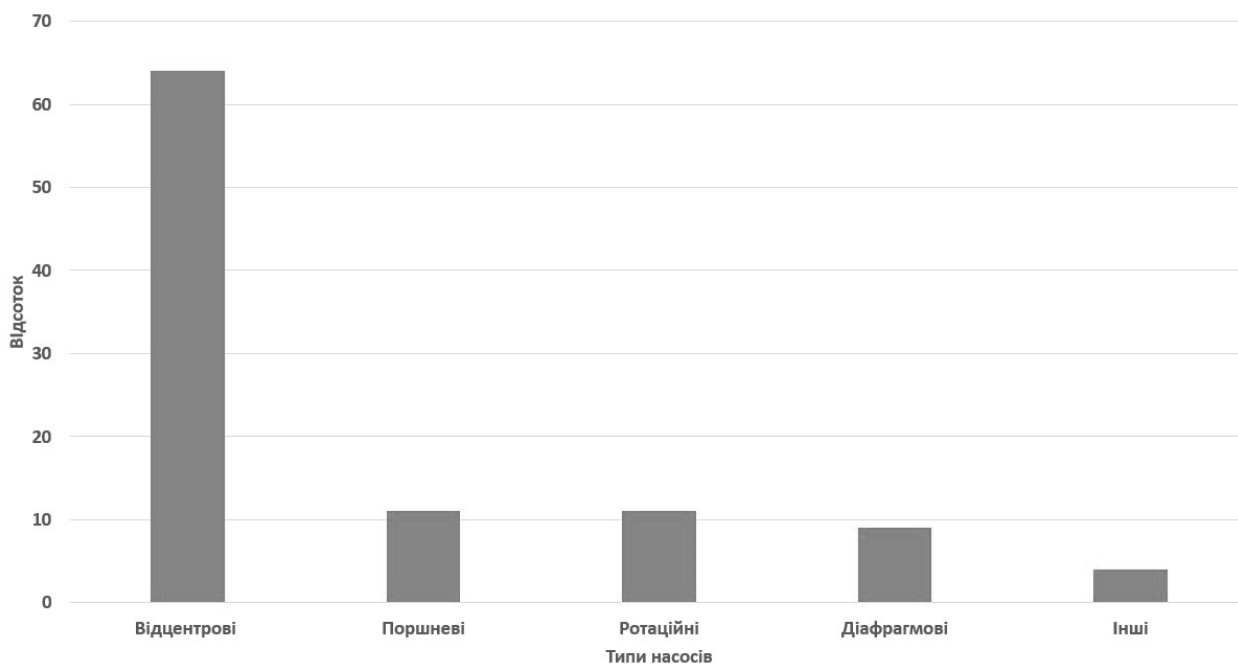


Рисунок 2.2 – Розподіл ринку насосів [10]

2.1 Класифікація насосів за різними критеріями

Класифікація насосів може бути проведена за різними критеріями, такими як принцип роботи, застосування, конструктивні особливості та інші. Розглянемо декілька основних схем класифікації насосів.

2.1.1 За принципом роботи

Погружні насоси.

Погружні насоси розташовані під рівнем рідини і зазвичай приводяться в дію електричним двигуном. Вони використовуються для перекачування рідини з глибинних джерел, таких як свердловини або водойми. Застосовуються для водопостачання в домогосподарствах та промисловості, для водознабження, водовідведення та ірригації.

Відцентрові насоси.

Відцентрові насоси використовують відцентрову силу для перекачування рідини. Рідина потрапляє в обертовий елемент насоса і виходить через центральний вихід з підвищеним тиском. Застосовуються у широкому спектрі

сфер, включаючи водопостачання, системи опалення та охолодження, хімічну промисловість, нафтогазову промисловість тощо.

Поршневі насоси.

Поршневі насоси використовують поршні для створення тиску у замкнутій камері. Поршень переміщається вперед і назад, стискаючи рідину і переміщуючи її через систему. Застосовуються у гідроприводах, в системах високого тиску, в автомобільній та аерокосмічній техніці та в інших галузях.

Вихрові насоси.

Використовують комбінацію відцентрових та вихрових сил для перекачування рідини. Вони особливо ефективні для перекачування рідин з великим вмістом твердих частинок, таких як стічні води або води з відходами. Застосовуються у водопостачанні, каналізаційних системах, хімічній та нафтогазовій промисловості.

Перистальтичні насоси.

Роблять стискання гумового шлангу для переміщення рідини. Шланг стискати та розширюється циліндричними роликками або ручками, що стискають та розширюють його, пересуваючи рідину по шляху. Застосовуються в лабораторних дослідженнях, медичних пристроях для перекачування крові та інших тілесних рідин, а також у харчовій промисловості для перекачування продуктів без забруднення.

Ротаційні насоси.

Ротаційні насоси працюють за допомогою обертання рухливих частин, таких як ротори або лопаті, що в результаті створює тиск, який переміщує рідину. У більшості ротаційних насосів рідина входить в насос через центр або з боку і виходить через обертовий елемент з підвищеним тиском. Застосовуються в системах водопостачання, опалення, охолодження, в хімічній та нафтогазовій промисловості, в системах виробництва та обробки рідин, а також в агропромисловому секторі.

Діафрагмові насоси.

Діафрагмові насоси працюють за допомогою переміщення гнучкої діафрагми, яка стискає та розширюється, пересуваючи рідину. Порожниста діафрагма може використовувати різні методи для стискання, такі як повітря, рухомі частини або рідини, що стискають діафрагму. Застосовуються там, де потрібно забезпечити безпосередній контакт з рідинами або де потрібно перекачувати рідини з високою в'язкістю або хімічно активні рідини. Вони використовуються у медичних пристроях, фармацевтичній промисловості, харчовій промисловості (наприклад, у виробництві напоїв та харчових добавок), а також у лабораторних дослідженнях та інших галузях, де потрібен точний та надійний перенос рідини.

2.1.2 За конструктивними особливостями

Одноступінчасті / багатоступінчасті насоси.

Одноступінчасті насоси: мають лише один етап або ступінь обробки. Це означає, що рідина перекачується через один робочий елемент (наприклад у відцентрових насосах) перед виходом з насоса.

Багатоступінчасті насоси: мають більше одного етапу обробки, тобто рідина проходить через кілька робочих елементів у послідовності. Кожен етап забезпечує додатковий підйом тиску. Це може бути доцільно для перекачування рідини на велику висоту або при необхідності великого підйому тиску.

Горизонтальні / вертикальні насоси.

Горизонтальні насоси: мають основний валик, який орієнтований горизонтально, тобто паралельно з підлогою. Це типовий варіант для багатьох типів насосів.

Вертикальні насоси: основний валик орієнтований вертикально, тобто в напрямку земної осі. Це може бути корисним для використання в глибоких свердловинах або в установках, де місце обмежено горизонтально.

Безмоторні / моторні насоси

Безмоторні насоси: не включають в себе мотор (електричний двигун) в своїй конструкції і вимагають окремого джерела енергії для приводу, такого як електромотор або двигун внутрішнього згорання.

Моторні насоси: мають мотор (електричний або інший тип двигуна) вбудований у свою конструкцію і приводяться в дію безпосередньо від нього.

2.1.3 За застосуванням

Водопостачання та водовідведення: насоси, що використовуються для перекачування води.

Хімічна промисловість: насоси, які витримують агресивні середовища та корозію.

Нафтова та газова промисловість: насоси для перекачування нафти, газу та інших продуктів.

Медичні насоси: використовуються в медичних пристроях, таких як апарати штучного кровообігу.

Харчова промисловість: насоси для перекачування продуктів харчування, наприклад, молока чи соків.

Інший критерій класифікації – це спосіб встановлення насоса. Вони можуть бути стаціонарними, колісними або плаваючими, залежно від того, як вони встановлені та як використовуються. Наприклад, стаціонарні насоси зазвичай встановлюються на основі та працюють на постійній основі, тоді як колісні можуть бути пересувними та використовуватися для забезпечення водопостачання в деяких місцях. Плаваючі насоси часто використовуються для відкачування води з затоплених територій або для надання допомоги при підтриманні рівня води в каналах та озерах.

2.2 Відцентрові насоси

Відцентрові насоси використовуються через їхню простоту та здатність генерувати відносно високе співвідношення тиску на короткій осьовій відстані. Загалом, відцентрові насоси використовуються скрізь, де необхідна будь-яка кількість рідини для переміщення з одного місця в інше. Це стосується великої кількості застосувань і послуг, включаючи електростанції, водопровідні установки (тобто каналізаційні, дренажні або зрошувальні тощо), нафтопереробні заводи, хімічні заводи, металургійні комбінати, харчову промисловість, шахти, днопоглиблювальні та струменеві роботи, гідравлічну енергетику. послуги та майже всі судна, які рухаються паровим чи дизельним двигуном [11]. На рисунку 2.3 показано, як ринок насосів розподілений між різними промисловими секторами.

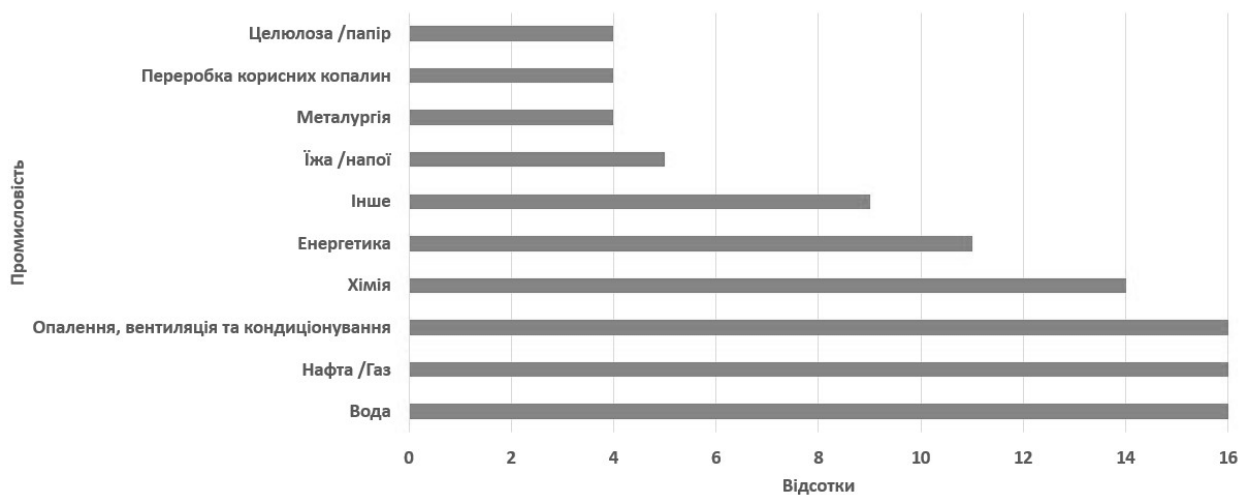


Рисунок 2.3 – Огляд застосувань відцентрових насосів [10]

Крім того, відцентрові насоси використовуються в таких сферах послуг, як кондиціонування повітря, холодильна техніка, целюлозно-паперові фабрики та текстильна промисловість. Незважаючи на те, що ці насоси мають багато спільного, вони відрізняються за дизайном і конструкцією, щоб відповідати конкретним вимогам кожної служби.

Існує два класи насосів: (об'ємні та безоб'ємні насоси). Об'ємний насос працює, виштовхуючи певну кількість рідини з області вхідного тиску насоса в зону нагнітання. Опір потоку є визначальним фактором об'єму рідини, що подається за цикл у випадку не об'ємного насоса. Насос створює силу на рідину, яка є постійною для кожної конкретної швидкості насоса. Якщо вихідний отвір об'ємного насоса повністю закрити, тиск на виході зросте до максимального для насоса, що працює на максимальній швидкості [12].

Іншим критерієм класифікації відцентрових насосів є спосіб протікання рідини через насос. Потік рідини через насос є відображенням конструкції корпусу та робочого колеса. Відцентровий насос може підтримувати радіальний потік, осьовий потік і змішаний потік. У насосах радіального типу рідина всмоктується в центрі робочого колеса і виводиться вздовж лопатей робочого колеса по його колу. У осьових насосах рідина рухається в паралельному напрямку до валу, і їх іноді називають пропелерними насосами через схожість функцій з гребним гвинтом човна. Характеристики насосів радіальної та осьової подачі можна побачити в насосах змішаної подачі [13].

Робота відцентрових насосів залежить від того, чи заповнений корпус рідиною під час запуску, чи ні. Відсутність рідини під час запуску призводить до того, що робоче колесо насоса зв'язане газом і не здатне перекачувати, коли корпус заповнений парами або газами. Більшість відцентрових насосів ставлять нижче джерела рідини, щоб вони завжди були заповненими і не мали проблем з повітрям. Подібного ефекту можна досягти, подаючи рідину на всмоктування насоса під тиском іншого насоса у всмоктувальній лінії [14].

Потужність насоса – це об'єм рідини, що подається насосом за одиницю часу. Виражається в кубічних метрах за секунду. Потужність насоса є важливим параметром у будь-якому застосуванні насоса, оскільки він визначає розмір, тип і вартість насоса.

На потужність насоса, як і будь-якого іншого пристрою, впливає вихід з ладу будь-якого з його компонентів, і одним з важливих факторів, який

розробники насосів беруть до уваги під час проектування насоса, щоб уникнути виходу з ладу під час експлуатації, є кавітація. Кавітація призводить до утворення бульбашок пари в рідині внаслідок зниження тиску нижче тиску її парів. Кавітація викликається зниженням тиску всмоктування, підвищенням температури всмоктування або швидкістю потоку, більшою за ту, на яку розрахований насос [15]. Під час кавітації порожнини руйнуються під високим тиском, що генерує різкий звук розтріскування, який зазвичай називають шумом. Сила кавітації визначається ступенем шуму, що створюється кавітацією. Шум можна почути у всмоктувальному патрубку насоса та навколо нього. Щоб уникнути кавітації, тиск рідини повинен підтримуватися вище тиску насичення в усьому насосі. Чистий позитивний напір на всмоктуванні – це показник, який використовується для перевірки того, чи достатній тиск рідини, що перекачується, для уникнення кавітації [12].

Надійність і ефективність відцентрових насосів залежить від їх механічної та гідравлічної придатності. Невідповідна конструкція може вплинути на термін служби насоса. Умови перекачування, ущільнення і геометрія робочого колеса є механічними характеристиками, в той час як швидкість потоку, характеристики рідини і робочі точки є деякими з гідравлічних міркувань. Умови всмоктування є життєво важливими для проектування та встановлення відцентрових насосів [16].

На продуктивність насоса значною мірою впливає конструкція всмоктувальної частини насоса. Деякі методика пов'язані зі зміною конструкції всмоктувальної сторони, а деякі – зі зміною конструкції насоса [17].

2.2.1 Конструкція відцентрового насоса

Відцентровий насос – це обертова машина, в якій потік і тиск створюються динамічно. Вхідний отвір не відгороджений від вихідного отвору, як у випадку з об'ємними насосами, незалежно від того, чи є вони поршнево-поступальними чи роторними за конфігурацією. Натомість відцентровий насос доставляє енергію рідині через зміни швидкості, які відбуваються, коли рідина протікає через

робоче колесо та пов'язані з ним фіксовані канали насоса. Усі насоси з крильчаткою є ротодинамічними, включно з робочими колесами радіального, змішаного та осьового потоку. Термін «відцентровий насос» має тенденцію охоплювати всі ротодинамічні насоси.

Відцентровий насос має дві основні частини: обертові частини, які включають робоче колесо та вал, і нерухомі частини, що містять корпус, кришку корпусу та підшипники. Компоненти відцентрового насоса показано на рисунку 2.4.

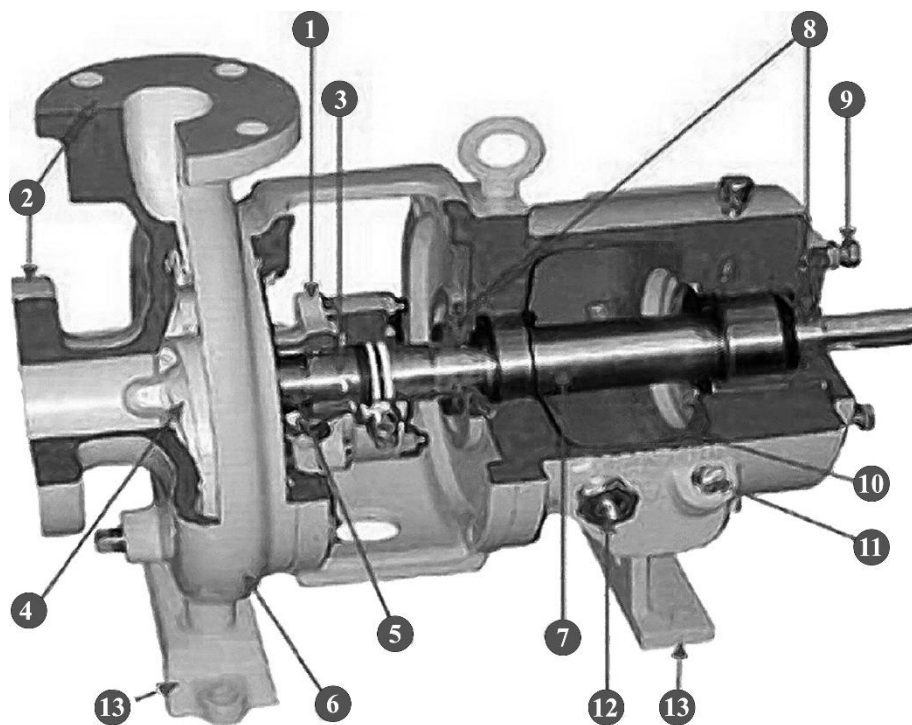


Рисунок 2.4 – Конструкція відцентрового насоса [17]:

1 – підшипникова коробка; 2 – фланці; 3 – ущільнення; 4 – крильчатка насоса; 5 – валова гільза; 6 – корпус; 7 – вал насоса; 8 – кришка корпусу; 9 – отвір; 10 – місце змащення; 11 – точка змащення; 12 – зливний отвір; 13 – ніжки корпусу.

Крильчатка є основним компонентом відцентрового насоса. Вона відповідає за перетворення крутного моменту, прикладеного до валу насоса, в тиск і кінетичну енергію рідини, що перекачується.

Компонент, який містить робоче колесо насоса, зазвичай називається корпусом насоса. Корпус насоса має всмоктувальний і нагнітальний отвори для основного потоку насоса і зазвичай має невеликі зливні та вентиляційні фітинги для видалення газів, захоплених у корпусі насоса, або для осушення корпусу насоса для технічного обслуговування.

Насоси зі спіральним корпусом зазвичай називають спіральними. Цей тип насоса отримав свою назву через спіралевидний корпус, що оточує робоче колесо. Його поперечний переріз навколо крильчатки поступово збільшується.

У пропелерних та інших насосах, в яких використовуються осьові робочі колеса, використовувати спіральний корпус непрактично. Замість цього робоче колесо укладено в кожух, схожий на трубу. Дифузор складається з кількох лопаток, розташованих навколо робочого колеса. Конструкція дифузора аналогічна спіралі з декількома горловинами.

2.2.2 Робота відцентрового насоса

Відцентровий насос є однією з найпростіших машин будь-якого підприємства. Його функція полягає в тому, щоб перетворювати енергію основного двигуна (електродвигуна, дизельного двигуна або турбіни) спочатку в швидкість або кінетичну енергію, а потім в енергію тиску рідини, що перекачується. Зміна енергії відбувається за допомогою двох основних частин насоса, робочого колеса та спіралі або дифузора

Волют або дифузор – це нерухома частина, яка перетворює кінетичну енергію в енергію тиску.

Робоче колесо, що обертається, подає енергію рідині, що перекачується. Це найважливіший і єдиний обертовий елемент насоса. Дифузор, наступний за робочим колесом, може перетворювати кінетичну енергію в енергію тиску, але не може збільшити загальну енергію рідини. Робоче колесо містить радіальні проточні канали, нахилені до осевого напрямку в насосі змішаного потоку, утворені обертовими лопатками, розташованими по колу. Потік входить у насос близько до центру і потім рухається від центру до країв робочого колеса.

Однією з переваг відцентрового насоса є його здатність працювати в широкому діапазоні витрат. Відцентровий насос, що працює на постійній швидкості, може забезпечити будь-яку продуктивність від нуля до максимального номінального значення залежно від розміру насоса, конструкції та умов всмоктування. Загальний напір, що розвивається насосом, необхідна потужність і його результативність змінюються залежно від потужності насоса насосної системи.

Висновок до розділу 2

Відцентрові насоси широко використовуваними в різних галузях завдяки їх простоті, ефективності та здатності перекачувати великі об'єми рідини. Основні принципи роботи полягають у перетворенні кінетичної енергії рідини в енергію тиску за допомогою обертового робочого колеса. Класифікація насосів відбувається за різними критеріями, такими як принцип роботи та конструктивні особливості.

Основними компонентами відцентрового насоса є корпус, робоче колесо, вал, ущільнення та підшипники. Ефективність насоса залежить від його конструкції, умов експлуатації та властивостей перекачуваної рідини. Фактори, що впливають на роботу насоса, включають кавітацію, напір всмоктування та потужність.

Перевагами відцентрових насосів є простота конструкції, висока ефективність, широкий діапазон витрат та відносно низька вартість. Однак вони мають деякі недоліки, такі як низька всмоктувальна здатність та чутливість до кавітації.

РОЗДІЛ 3

КАВІТАЦІЯ У НАСОСАХ

Міжнародне енергетичне агентство (МЕА) повідомило, що 10 % світового споживання енергії припадає на насоси та насосне обладнання. Звідси зроблено висновок, що шляхом підвищення ефективності насосів і зниження їх енергоспоживання в цілому можна досягти реальних змін у глобальному споживанні енергії [18]. Але з іншого боку існують практичні обмеження, які накладаються на конструкцію насосу умовами процесу або середовищем, у якому насос найчастіше працює.

Однією з основних проблем при проектуванні та застосуванні відцентрових насосів є можливість контролювати та обмежувати розвиток кавітації. Як правило, малоімовірно, що насос працюватиме в усьому робочому діапазоні без кавітації. Але слід розрізняти загальну присутність кавітації та момент, коли рівень кавітації стає занадто високим і починає впливати на продуктивність насоса та пошкоджувати насос.

Кавітація може виникати на багатьох різних рівнях, починаючи від невеликої групи бульбашок і закінчуючи насосом, який повністю заблокований великою кількістю пари («паровий замок»), що спричиняє повне руйнування напору (рис. 3.1). Багато насосів, що працюють у виробництві, працюють із кавітацією, але з рівнем, прийнятним для їх призначення.

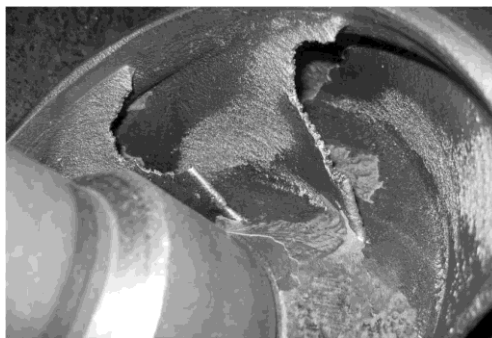


Рисунок 3.1 – Результуюче пошкодження безперервної кавітації на робочому колесі насоса [19]

Щоб визначити, який рівень кавітації прийнятний для конструкції, необхідно визначити певний критерій, заснований на тривалості служби або продуктивності.

Процес кавітації можна розділити на три окремі етапи. Першим кроком є початкове утворення бульбашки, інша назва цієї частини – початок кавітації. Після початкового формування (або зародження) бульбашка переходить на наступний етап, а саме на етап зростання, де бульбашка зростатиме до певного розміру, що контролюється силами (тиском), що діють на бульбашку. Колапс бульбашки є основною відмінністю між справжньою кавітацією та переходом рідини до пари.

3.1 Кавітація відцентрового насоса

За механізмом утворення бульбашок у рідині кавітацію відцентрового насоса можна розділити на два основних типи – пароподібна кавітація та газова кавітація [20].

Залежно від місця виникнення кавітації та типу пошкодження насоса ці дві категорії можна розділити на різні типи.

Пароподібна кавітація.

Пароподібна кавітація становить близько 70 % усієї кавітації [21] і є найпоширенішою формою кавітації, яка зустрічається на підприємствах. Існує два види пароподібної кавітації: класична кавітація та кавітація з внутрішньою рециркуляцією.

Класична кавітація.

Класична кавітація становить близько 70 % пароподібної кавітації [21]. Цей тип кавітації виникає, коли абсолютний тиск рідини, що перекачується, знижується до рівня або нижче тиску пари в отворі робочого колеса. В результаті утворюється бульбашка. Зменшення тиску в вушку крильчатки викликано коливаннями швидкості рідини та втратами на тертя, коли рідина надходить у

крильчатку. Гурчання або тріск створюється через зрив бульбашок. Сила бульбашок, що стискаються, є достатньою, щоб викликати невеликі ділянки втоми на поверхні робочого колеса. Залежно від тяжкості кавітації також може спостерігатися зниження продуктивності насоса.

Кавітація внутрішньої рециркуляції.

Цей тип кавітації називається «умовою низького потоку», коли вихідний потік насоса обмежений і рідина не може вийти з насоса. Рідина змушена рециркулювати із зон високого тиску всередині насоса в зони низького тиску через робоче колесо. Є дві причини цього типу кавітації: по-перше, рідина, що циркулює всередині спіралі насоса зі швидкістю двигуна, призводить до швидкого перегріву. По-друге, рідина змушена проходити через жорсткі допуски з високою швидкістю. Ці жорсткі допуски є поперек смуг зносу на закритому робочому колесі та між передніми краями робочого колеса та спіральним корпусом на відкритому робочому колесі. Пошкодження від цього можна побачити на передньому краї лопатей робочого колеса в напрямку вушка робочого колеса [21].

Газова кавітація.

Газоподібна кавітація виникає, коли повітря втягується в трубопровід і насос. Приклад цього процесу можна побачити на підйомному насосі. Підйомні насоси часто починають працювати гірше та втягують повітря у всмоктувальну трубу та насос. Повітря може потрапляти в насос у різних точках, включаючи ущільнення валу насоса, лицьову панель фланця або з'єднувальні кільця на всмоктувальному трубопроводі. Певна кількість повітря (в межах піввідсотка об'єму) всередині насоса не шкідлива; однак, якщо частка повітря збільшується до 6 %, виникає кавітація.

3.2 Проблеми, пов'язані з кавітацією

Кавітація в насосах створює значні проблеми, які можуть вплинути на продуктивність, ефективність і загальну надійність насоса. Розглянемо основні проблеми, пов'язані з кавітацією.

Ерозія та пошкодження компонентів насоса – кавітація викликає утворення та згортання бульбашок пари в насосі, що призводить до інтенсивних ударних хвиль. Ці ударні хвилі призводять до ерозії та пошкодження компонентів насоса, особливо крильчаток, корпусів та інших поверхонь, які піддаються впливу бульбашок, що руйнуються.

Знижена ефективність насоса – наявність кавітації знижує загальну ефективність насоса. Коли бульбашки пари згортаються, вони створюють нерівномірний потік, що порушує безперебійну роботу насоса. Це порушення призводить до втрат енергії та зниження ефективності перекачування.

Збільшення витрат на технічне обслуговування – пошкодження, спричинені кавітацією, потребують частого технічного обслуговування та ремонту. Ремонт або заміна пошкоджених компонентів насоса може призвести до збільшення часу простою та збільшення експлуатаційних витрат. Профілактичне технічне обслуговування стає вирішальним для швидкого вирішення проблем, пов'язаних із кавітацією.

Шум і вібрація – кавітація створює шум і вібрацію в насосній системі. Раптове згортання бульбашок пари створює характерний звук, який часто описують як «лопання» або «стукіт». Надмірний шум і вібрація не тільки вказують на кавітацію, але також можуть сприяти структурній втомі та додатковому зносу.

Порушення роботи та надійності насоса – кавітація може призвести до нестабільної роботи насоса. Коливання витрат, тиску та продуктивності стають звичайними, що впливає на надійність насоса. Нестабільна робота насоса може мати каскадний вплив на всю систему, впливаючи на наступні процеси та обладнання.

Зниження ефективності насоса з часом – тривалий вплив кавітації прискорює зниження ефективності насоса з часом. Кумулятивний ефект пошкодження, пов'язаного з кавітацією, може призвести до поступового зниження продуктивності насоса, що вимагає більш частого технічного обслуговування для підтримки ефективності роботи.

Ризик поломки, спричиненої кавітацією – серйозна та ліквідована кавітація може призвести до поломки насоса. Безперервна ерозія поверхонь робочого колеса та корпусу в поєднанні з механічними навантаженнями, спричиненими бульбашками, що згортаються, може зрештою призвести до катастрофічної поломки насоса. Такі несправності можуть призвести до тривалих простоїв, дорогого ремонту та потенційних ризиків для безпеки.

Проблеми у виявленні та моніторингу кавітації – виявлення кавітації на ранніх стадіях може бути складним завданням. Традиційні методи можуть не допомагати відразу визначити наявність та ступінь проблеми з кавітацією в реальному часі. Для точної оцінки та вирішення проблем кавітації потрібні передові технології моніторингу та датчики.

Складність проектування системи – проектування насосної системи, яка мінімізує ризик кавітації, вимагає ретельного розгляду різних факторів, властивості рідини, вибір насоса та конфігурацію системи. Досягнення оптимального балансу між цими факторами може бути складним і може потребувати спеціальних інженерних знань.

Екологічний та економічний вплив – кавітація насоса може призвести до неефективного використання води та енергії. У програмах, де перекачуються великі обсяги води, вплив на навколишнє середовище втрат енергії та збільшення споживання води може бути значним. Крім того, економічні наслідки вирішення проблем, пов'язаних з кавітацією, можуть вплинути на загальну вартість експлуатації насоса.

3.3 Моніторинг кавітації відцентрових насосів

Існує багато ознак, які вказують на виникнення та розвиток кавітації у відцентровому насосі. Методи, які використовуються для виявлення та діагностики кавітації, використовують ці ознаки.

Було проведено багато досліджень щодо виявлення кавітації у водяних насосах і водяних турбінах. Існує два різних способи виявлення початку кавітації в насосах: аналітичні методи та інженерні методи [21].

Аналітичні методи.

Чисельний або аналітичний підхід часто використовується для передбачення початку кавітації в окремій бульбашці, але рідко застосовується в самому насосі. Існує кілька добре відомих моделей, які можна використовувати для опису явища та поведінки кавітаційних ядер. Однак не існує точного алгоритму для розрахунку параметрів стану насоса, таких як вібрація, шум і швидкість, які можна використовувати для визначення кавітації. Більшість аналітичних методів було зосереджено на впливі кавітації на продуктивність відцентрового насоса [12].

Інженерні методи.

Метод виявлення кавітаційної несправності на основі сигналу базується на тому факті, що супутнє явище кавітації змінюватиме акустичні сигнали, сигнали вібрації та пульсації тиску всередині насоса. Між зміною сигналу і виникненням кавітації існує певна залежність. Датчики сигналу встановлені в різних положеннях насоса, збираючи сигнали для аналізу.

Вібраційний метод.

Коли виникає несправність, найбільш прямим відображенням його є аномальна зміна вібрації механічного обладнання. Насос матиме аномальну вібрацію після виникнення кавітації. Вібраційні сигнали містять багато інформації про кавітаційні несправності. Частота вібрації, викликаної кавітацією, перевищуватиме частоту обертання лопаток.

Дані про вібрацію зазвичай збираються за допомогою датчиків прискорення, які встановлені в різних частинах поблизу насоса [22], включаючи основу, впускний отвір, випускний отвір і корпус насоса. Загальний монтаж ділиться на три напрямки: осьовий, радіальний і вертикальний. Вібраційний сигнал, спричинений кавітацією, відрізняється від вібраційного сигналу під час нормальної роботи, незалежно від того, чи це дисперсія у часовій області чи спектр у частотній області – рисунок 3.2.

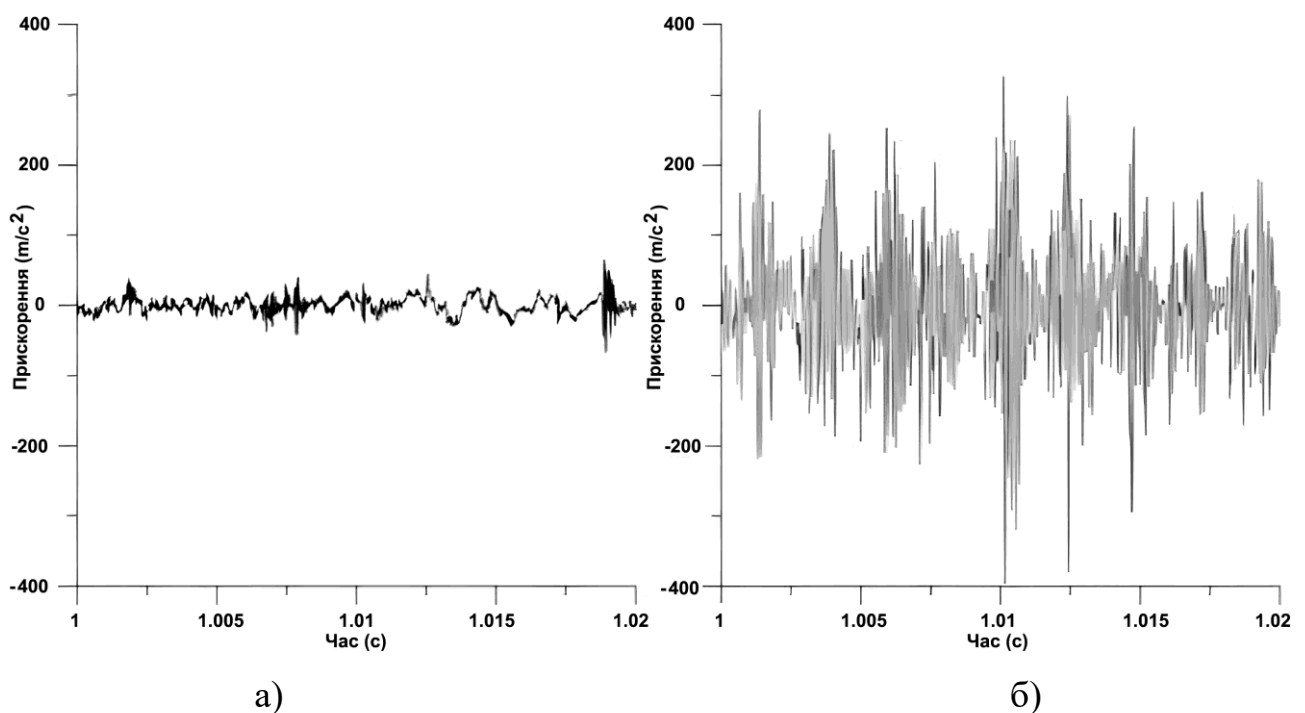


Рисунок 3.2 – Сигнали прискорення в часовій області в некавітаційному (а) та кавітаційному (б) станах [23]

Акустична емісія.

У процесі кавітації генерується велика кількість ударних хвиль, які впливають на деякі компоненти насосу, такі як робочі колеса, стінка труби тощо та формують середньо- та високочастотні сигнали в діапазоні 1 кГц ~ 1 МГц. Основними джерелами сигналів акустичної емісії в насосі є наступні:

1) точка найнижчого тиску під час роботи насоса, як правило, позаду за вхідним кінцем лопаті, яка найбільш схильна до кавітації,

- 2) нерегулярні коливання тиску в нестабільних умовах,
- 3) великі напруження зсуву в потоці води.

В процесі кавітації генерується велика кількість ударних хвиль, які впливають на деякі компоненти насоса, такі як робочі колеса, стінки труби і т.д., утворюючи середньо- і довгохвильові завихрення, формуючи середньо- та високочастотні сигнали в діапазоні 1 кГц~1 МГц, які поширюються вздовж насосної системи [24].

Датчики акустичної емісії зазвичай встановлюються на вході та виході з насоса, біля робочого колеса [25].

Багато параметрів акустичної емісії можна виділити з сигналу акустичної емісії включаючи енергію, амплітуду, час наростання, тривалість і так далі. Ці параметри можуть відображати кавітацію в насосі – рисунок 3.3 [26].

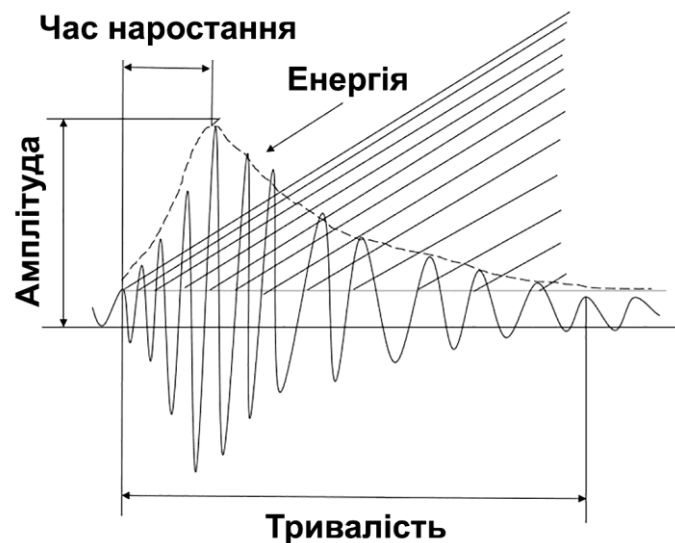


Рисунок 3.3 – Характерні параметри сигналу акустичної емісії [26]

Метод шуму.

Шум, що генерується насосом під час роботи, поділяється на механічний і гідродинамічний шум, причому шум, викликаний кавітацією, відноситься до гідродинамічного шуму – рисунок 3.4.

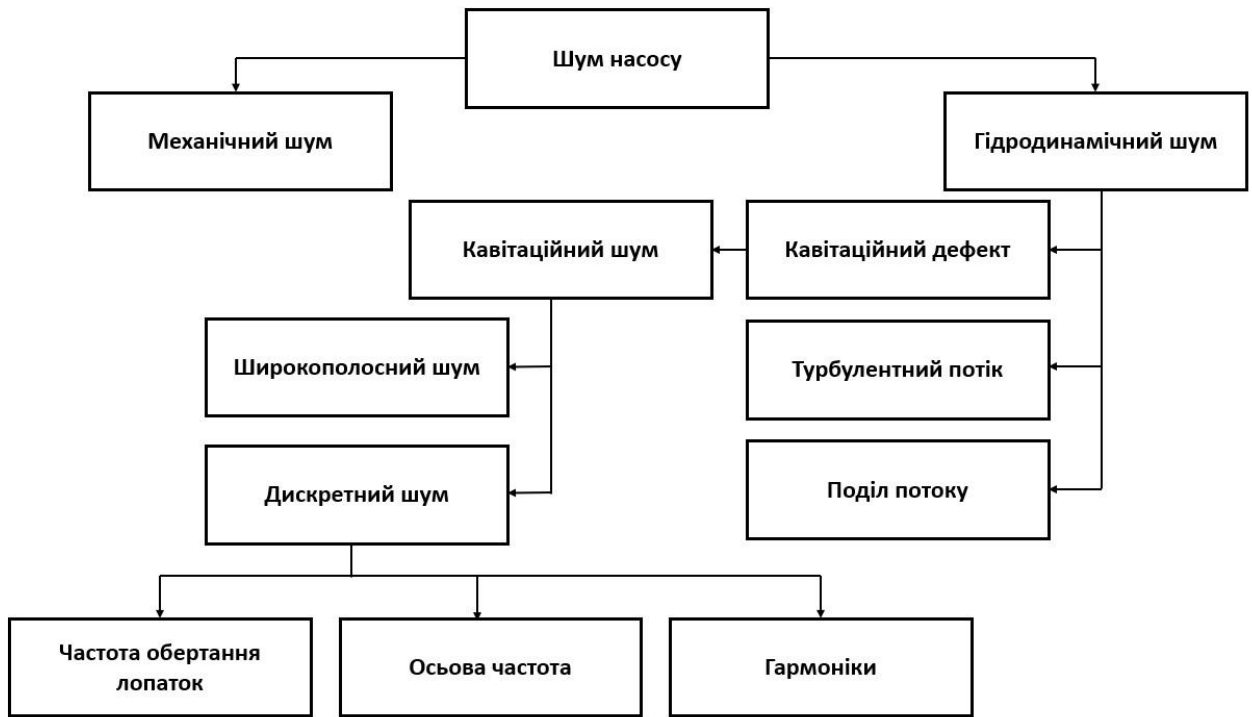


Рисунок 3.4 – Види шуму, що генерується насосом під час роботи [27]

При виникненні кавітації генерується шум унікальної частоти, яка сильно відрізняється від частоти проходження лопатей. Він невіддільний від генерації та колапсу бульбашок. Коли кавітація починається, бульбашки утворюються на вході в лопать. Коли кавітація розвивається до певною мірою, канал потоку заповнюється бульбашками, і високий тиск змушує ці бульбашки руйнуватися. Утворений шум передається назовні насоса через корпус насоса, і сигнал вловлюється звуковим датчиком. Шум використовують як індикатор початку кавітації. Шумовий метод є перспективним для виявлення початку кавітації, і він може бути застосований до будь-якого стану потоку, тому були проведені широкі дослідження по застосуванню акустичних методів для виявлення кавітації [27].

Метод пульсації тиску.

Насос створює різницю тисків при стабільному потоці для транспортування рідини. У цьому процесі створюється статична складова тиску разом з динамічною складовою компоненту тиску, тобто пульсація тиску.

Пульсація різних насосів за різних умов роботи відрізняється і зумовлена багатьма факторами, такими як динамічні та статичні перешкоди, вторинний потік, кавітація тощо [28]. Поле течії всередині насоса змінюється при виникненні кавітації, і пульсація тиску також змінюється на вході і виході.

Датчик тиску зазвичай встановлюється на вході і виході насоса біля фланця. Сигнал може бути періодичним або випадковий [29].

Після кавітації в першу чергу змінюється поле течії. Як сигнальна характеристика, що описує поля течії, пульсація тиску тісно пов'язана з виникненням кавітації, тому проводять виявлення кавітації методом пульсації тиску.

Висновок до розділу 3

Кавітація на відцентрові насоси може мати серйозні наслідки, такі як пошкодження компонентів насоса, зниження продуктивності, підвищення витрат на обслуговування, шум та вібрація, нестабільна робота, зниження ефективності, складнощі у проектуванні та негативний економічний та екологічний вплив.

Методи виявлення кавітації включають аналітичні та інженерні підходи, кожен з яких має свої переваги та обмеження. Важливо своєчасно виявляти та моніторити кавітацію для запобігання її негативному впливу, що дозволить покращити роботу та надійність відцентрових насосів.

РОЗДІЛ 4

PYTHON В ІНЖЕНЕРНИХ РОЗРАХУНКАХ

Python – це високорівнева, інтерпретована та універсальна мова програмування, яка виникла в кінці 1980-х років і отримала широку популярність завдяки своїй простоті та ефективності. Одна з основних особливостей Python – це чистий і зрозумілий синтаксис, який дозволяє легко читати і розуміти код, навіть людям, які тільки починають вивчати програмування.

Python підтримує багато парадигм програмування, включаючи процедурне, об'єктно-орієнтоване, функціональне та аспектно-орієнтоване програмування, що робить його універсальним інструментом для вирішення різноманітних завдань.

Інтерпретована природа Python дозволяє виконувати код без попередньої компіляції, що спрощує і прискорює процес розробки програмного забезпечення та експериментування з різними алгоритмами та рішеннями.

Однією з найбільших переваг Python є його велика спільнота користувачів та активне співтовариство розробників, які постійно вносять удосконалення та розширення до мови, що робить її ще більш потужним і зручним інструментом.

Python має багато розширень і бібліотек, які дозволяють розв'язувати різноманітні завдання, включаючи наукові обчислення, обробку даних, веб-розробку, штучний інтелект, машинне навчання та багато іншого, що робить його ідеальним інструментом для інженерів, науковців та програмістів у різних галузях.

Динамічна типізація Python дозволяє створювати гнучкі та масштабовані програми, а автоматичне управління пам'яттю полегшує процес програмування і зменшує ймовірність виникнення помилок.

Python має велику кількість інструментів для автоматизації тестування, що дозволяє створювати надійне та стабільне програмне забезпечення, а також спрощує процес розробки і впровадження нових функцій та змін.

Завдяки своїй переносимості Python може працювати на різних платформах, включаючи Windows, macOS та Linux, що робить його ідеальним вибором для розробки крос-платформенного програмного забезпечення.

Python постійно оновлюється і розвивається, випускаючи нові версії з новими функціями та поліпшеннями, що дозволяє користувачам бути в курсі останніх тенденцій в програмуванні та використовувати найсучасніші інструменти для вирішення своїх завдань.

На сьогодні, Python залишається однією з найбільш актуальних та потужних мов програмування, яка відкриває великі можливості для інженерів, науковців та програмістів.

4.1 Особливості Python для інженерних розрахунків

Python використовується для різноманітних інженерних розрахунків завдяки своїй потужності та гнучкості. Його вбудовані математичні операції, такі як арифметичні операції, операції з логікою та порівняння, надають можливість ефективно виконувати різні обчислення без необхідності використання додаткових бібліотек або інструментів.

Структури даних у Python, такі як списки, кортежі, словники та множини, дозволяють організовувати та обробляти великі обсяги інформації, що часто зустрічається в інженерних задачах. Наприклад, списки можуть використовуватися для зберігання та обробки вимірювань, а словники – для представлення параметрів системи.

Однією з ключових особливостей Python є наявність багатоцільових бібліотек для наукових обчислень та інженерних додатків, таких як NumPy, SciPy, matplotlib та pandas. NumPy забезпечує підтримку векторизованих обчислень та операцій над масивами даних, що дозволяє швидко та ефективно виконувати складні обчислення.

SciPy надає широкий спектр числових алгоритмів для розв'язання різних задач, включаючи оптимізацію, інтегрування, розв'язання диференціальних рівнянь та інші.

Matplotlib використовується для візуалізації даних та результатів обчислень у вигляді графіків, діаграм та інших візуальних засобів, що сприяє зрозумінню та аналізу результатів роботи програми.

Pandas забезпечує потужні засоби для роботи з даними у форматі таблиць, що дозволяє ефективно обробляти, аналізувати та візуалізувати великі обсяги інженерних даних.

Крім цього, у Python є інструменти для роботи з геометричними обчисленнями (наприклад, бібліотека Shapely), обробки зображень та відео (OpenCV), обробки сигналів (SciPy.signal), статистичного аналізу (statsmodels) та багато іншого.

Враховуючи всі ці можливості, Python стає незамінним інструментом для інженерів у багатьох галузях, дозволяючи їм ефективно вирішувати складні завдання та розрахунки, реалізовувати нові ідеї та здійснювати наукові дослідження.

4.2 Спеціальні бібліотеки Python для інженерних розрахунків

Основними з них є NumPy, SciPy, matplotlib, SymPy та інші. Ці бібліотеки надають широкий спектр функцій та можливостей для аналізу даних, наукових обчислень, візуалізації результатів, символічних обчислень та багатьох інших інженерних завдань.

NumPy є однією з основних бібліотек для наукових обчислень у Python і є незамінним інструментом для роботи з масивами даних та векторизованими операціями. Вона дозволяє виконувати швидкі та ефективні обчислення над великими обсягами даних завдяки своїй оптимізованій реалізації внутрішніх алгоритмів.

Однією з ключових особливостей NumPy є підтримка множини математичних операцій та функцій, що дозволяє виконувати різноманітні операції лінійної алгебри, статистики, обробки сигналів, обробки зображень та інші наукові обчислення. Вона також забезпечує потужні можливості для індексації, зрізів, трансформацій та обробки даних у масивах.

Крім того, NumPy інтегрується з іншими науковими бібліотеками у Python, такими як SciPy, Pandas, Matplotlib тощо, що робить його основною складовою для великої кількості наукових та інженерних додатків у Python-екосистемі.

SciPy – це бібліотека, яка базується на NumPy і надає розширений набір числових алгоритмів для вирішення різних наукових та інженерних завдань. Вона включає в себе модулі для оптимізації, інтегрування, розв'язання диференціальних рівнянь, статистичного аналізу та багато інших. SciPy дозволяє виконувати складні обчислення та аналізувати дані за допомогою високоефективних алгоритмів.

Matplotlib є однією з найпопулярніших бібліотек для візуалізації даних у Python. Вона надає широкий спектр інструментів для створення різноманітних типів графіків та візуалізацій, таких як лінійні графіки, точкові графіки, гістограми, контурні графіки, теплові карти та інші.

Matplotlib дозволяє легко керувати розмірами, кольорами, стилями ліній, маркерами та іншими аспектами графіків для створення професійно виглядаючих візуалізацій. Вона також інтегрується з іншими бібліотеками для аналізу даних, такими як NumPy та Pandas, що робить її потужним інструментом для роботи з даними в Python.

Крім того, Matplotlib підтримує різні формати виводу, такі як PNG, PDF, SVG, EPS та інші, що дозволяє легко інтегрувати графіки в наукові публікації, презентації, веб-сторінки та інші медіа.

SymPy – це символьна математична бібліотека для Python, яка дозволяє виконувати символьні обчислення, такі як розв'язання рівнянь, диференціювання, інтегрування, розв'язання систем рівнянь та інші. За

допомогою SymPy можна створювати символічні вирази та виконувати над ними різноманітні операції, що дозволяє розв'язувати складні математичні задачі.

Крім цих основних бібліотек, існують також інші спеціалізовані бібліотеки для вирішення конкретних завдань у сфері інженерії. Наприклад, OpenCV для обробки зображень та відео, TensorFlow та PyTorch для машинного навчання та глибокого навчання, Pandas для роботи з даними у форматі таблиць та багато інших.

Розрахунок кавітації – це процес визначення утворення пазирів пару у рідині через зниження тиску нижче певного рівня. Один з методів розрахунку кавітації використовує рівняння Нав'є-Стокса для моделювання руху рідини, а також ураховує фізичні закономірності, що стосуються утворення пазирів пару.

Для цього припустимо, що у нас є геометрична модель каналу або насоса, через яку протікає рідина. Ми можемо використовувати NumPy для створення числової сітки, що описує цю геометрію, а також для обчислення та візуалізації параметрів рідини, таких як швидкість, тиск та щільність, які впливають на утворення пазирів пару.

Наприклад, ми можемо використовувати NumPy для створення тривимірного масиву, який представляє різні значення тиску у рідині в кожній точці нашої геометрії. Потім ми можемо застосувати рівняння Нав'є-Стокса до цього масиву, щоб обчислити градієнт тиску та швидкості руху рідини.

Крім того, ми можемо використовувати NumPy для візуалізації результатів, за допомогою бібліотеки Matplotlib, щоб побудувати тривимірні графіки тиску та швидкості руху рідини вздовж каналу або насоса. Це дозволить нам візуально аналізувати зони зниження тиску, де може виникнути кавітація.

Переваги використання цих бібліотек для інженерних задач очевидні: вони надають широкий спектр функціональності, високу швидкодію та ефективність обчислень, а також мають велику активну спільноту користувачів, яка постійно вносить удосконалення та розвиток цих інструментів. Таким чином,

використання спеціалізованих бібліотек Python стає ключовим для швидкого та точного розв'язання складних інженерних проблем у різних галузях

Висновок до розділу 4

Python є потужним інструментом для інженерів у різних сферах їхньої діяльності завдяки його простому та зрозумілому синтаксису. Ця мова програмування дозволяє швидко вивчати та розробляти програми навіть інженерам без глибокого досвіду у програмуванні. Інтерпретована природа Python робить процес розробки ефективним та гнучким.

Широкий спектр бібліотек у Python дозволяє виконувати різноманітні завдання, включаючи наукові обчислення, обробку даних, машинне навчання та інші. Також його переносимість робить його ідеальним вибором для розробки крос-платформенного програмного забезпечення.

Застосування Python для інженерних розрахунків включає моделювання та симуляцію фізичних явищ, аналіз даних, розробку систем управління та автоматизацію різноманітних завдань. Це робить Python чудовим інструментом для інженерів у багатьох сферах, де потрібні обчислення, аналіз та автоматизація.

РОЗДІЛ 5

ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ВИНИКНЕННЯ КАВІТАЦІЇ В НАСОСАХ

Основні параметри, які впливають на процес кавітації – це швидкість потоку, тиск та в'язкість рідини.

Швидкість потоку важлива, оскільки при великих швидкостях руху рідини тиск може опуститися до рівня, коли рідина може утворювати парові бульбашки. Це може статися, наприклад, коли рідина прискорюється або проходить через вузькі отвори.

Тиск також впливає на кавітацію. При зниженні тиску рідина може швидше досягти тиску насичення, за якого вона переходить у парову фазу. Це може статися, наприклад, при зменшенні тиску внаслідок збільшення висоти або через наявність вакууму у системі.

Для кращого розуміння цих процесів використовують кавітаційне число. Кавітаційне число допомагає розуміти, наскільки близько потік рідини до критичної точки, коли кавітація стає помітною [30].

Кавітаційне число описує співвідношення між тиском пари рідини, тиском у рідині та кінетичною енергією рідини.

Значення кавітаційного числа, при якому виникає кавітація, називають критичним. Коли кавітаційне число перевищує критичне значення, це означає, що існує ризик виникнення кавітації в системі.

Кавітаційне число (σ) обчислюється за формулою 5.1 [31]:

$$\sigma = \frac{P_{in} - P_{vapor}}{0.5 \cdot \rho \cdot V^2}, \quad (5.1)$$

де P_{in} – тиск на вході насоса (Па),

P_{vapor} – тиску парів рідини (Па),

V – швидкість руху рідини (м/с),

ρ – густина води ($\rho = 1000$ кг/м³).

Критичне кавітаційне число може варіювати залежно від конкретної системи та умов експлуатації. Для кожного конкретного випадку важливо встановити критичне значення, щоб ефективно запобігти кавітації та максимізувати продуктивність гідродинамічних систем.

Кожен компонент кавітаційного числа має свій вплив на ймовірність виникнення кавітації.

1. Тиск (P_{in}):

– високий P_{in} зменшує ймовірність кавітації. Це пов'язано з тим, що для утворення бульбашок кавітації потрібна різниця тисків між P_{in} і P_{vapor} – чим вище P_{in} , тим менша ця різниця тисків;

– низький P_{in} збільшує ймовірність кавітації. Це пов'язано з тим, що при низькому P_{in} бульбашкам кавітації легше утворюватися, оскільки різниця тисків між P_{in} і P_{vapor} більша.

2. Тиск пари (P_{vapor}):

– високий P_{vapor} збільшує ймовірність кавітації. Це пов'язано з тим, що при високому P_{vapor} бульбашкам кавітації легше утворюватися, оскільки їм потрібно менше різниці тисків, щоб подолати тиск пари;

– низький P_{vapor} зменшує ймовірність кавітації. Це пов'язано з тим, що при низькому P_{vapor} бульбашкам кавітації важче утворюватися, оскільки їм потрібна більша різниця тисків, щоб подолати тиск пари.

3. Густина рідини (ρ):

– висока густина зменшує ймовірність кавітації. Це пов'язано з тим, що при високій густині рідини бульбашкам кавітації важче утворюватися, оскільки їм потрібно подолати більшу інерцію рідини;

– низька густина збільшує ймовірність кавітації. Це пов'язано з тим, що при низькій густині рідини бульбашкам кавітації легше утворюватися, оскільки їм потрібно подолати меншу інерцію рідини.

4. Швидкість руху рідини (V):

– висока швидкість збільшує ймовірність кавітації. Це пов'язано з тим, що при високій швидкості рідини тиск в точці може знизитися до рівня тиску пари, що призводить до утворення бульбашок кавітації;

– низька швидкість зменшує ймовірність кавітації. Це пов'язано з тим, що при низькій швидкості рідини тиск в точці зазвичай не знижується до рівня тиску пари, що робить утворення бульбашок кавітації менш ймовірним.

Для визначення залежності кавітаційного числа від вхідних параметрів скористаємось методом імітаційного (стохастичного) моделювання. В основі методу імітаційного (стохастичного) моделювання лежить генерація випадкових вибірок та аналіз їх поведінки.

Визначимо відповідні фактори, що впливають на кавітаційне число, такі як тиск, швидкість, температура тощо. Призначимо розподіл ймовірностей для кожного вхідного параметра. Ці розподіли описують ймовірність набути різних значень для кожного параметра.

Суть моделювання полягає у створенні випадкових наборів вхідних значень на основі заданих розподілів ймовірностей. Це створює велику кількість змодельованих сценаріїв.

Для кожного змодельованого сценарію (комбінації вхідних значень) розрахуємо відповідне кавітаційне число, використовуючи формулу розрахунку. Проаналізуємо отримані значення кавітаційного числа для всіх змодельованих сценаріїв.

Алгоритм побудови моделі та його програмна реалізація включає наступні кроки:

- імпортуємо бібліотеки `numpy` і `matplotlib.pyplot`,
- визначаємо функцію `generate_random_params`, яка генерує випадкові значення тиску та швидкості на вході,
- визначаємо функцію `cavitation_number`, яка обчислює число кавітації,
- створюємо словник зі значеннями густини рідини та тиском пари для різних рідин,

- визначаємо температури та відповідні тиски пари для кожної рідини.
Для моделювання обираємо воду, етанол та ацетон.
- Встановлюємо значення для кількості генерацій, тиску на вході насоса та мінімальної та максимальної швидкості руху рідини.
- Створюємо список liquids з даними про рідини та їх характеристиками.
- Генеруємо випадкові параметри тиску та швидкості на вході.
- Будуємо графіки розподілу значень тиску та швидкості.
- Обчислюємо середні значення коефіцієнта кавітації для кожної рідини за допомогою циклу.
- Будуємо графіки залежності коефіцієнта кавітації від температури для кожної рідини.

Код реалізації моделі приведено в додатку А.

Вхідні параметри для моделювання обрано наступні:

$N = 1000$ – кількість генерацій значень,

$P_{in} = 200\,000$ – тиск на вході насоса, Па,

$V_{min} = 3$ – швидкість руху рідини, м/с,

$V_{max} = 5$ – швидкість руху рідини, м/с.

З точки зору імітації роботи насосу, генерація вхідних параметрів – тиску і швидкості – відбувається таким чином, щоб вони відповідали реальним умовам роботи системи, але при цьому були стохастичними, тобто мали випадковий характер.

Значення тиску P_{in} генеруються за допомогою нормального розподілу (np.random.normal). Нормальний розподіл часто використовується, коли дані можуть приймати значення від $-\infty$ до $+\infty$ і мають симетричний вигляд. У цьому випадку середнє значення тиску P_{in} визначає центр розподілу, а стандартне відхилення $P_{in} * 0,025$ контролює ширину розподілу, тобто ступінь розсіювання від середнього значення.

Щодо швидкості V , вона генерується за допомогою рівномірного розподілу (np.random.uniform). Рівномірний розподіл використовується, коли

кожне значення в діапазоні має однакову ймовірність виникнення. У цьому випадку мінімальна швидкість V_{min} та максимальна швидкість V_{max} визначають межі цього діапазону, і кожне значення в цьому діапазоні має однакову ймовірність вибору.

Таким чином, нормальний розподіл використовується для тиску, тому що він дозволяє врахувати можливість різних значень тиску, які можуть бути симетрично розподілені навколо середнього значення, в той час як рівномірний розподіл використовується для швидкості, оскільки він дозволяє випадковим чином вибирати значення з однаковою ймовірністю з певного діапазону.

Розподіл тиску та швидкості руху рідини наведено на рисунку 5.1.

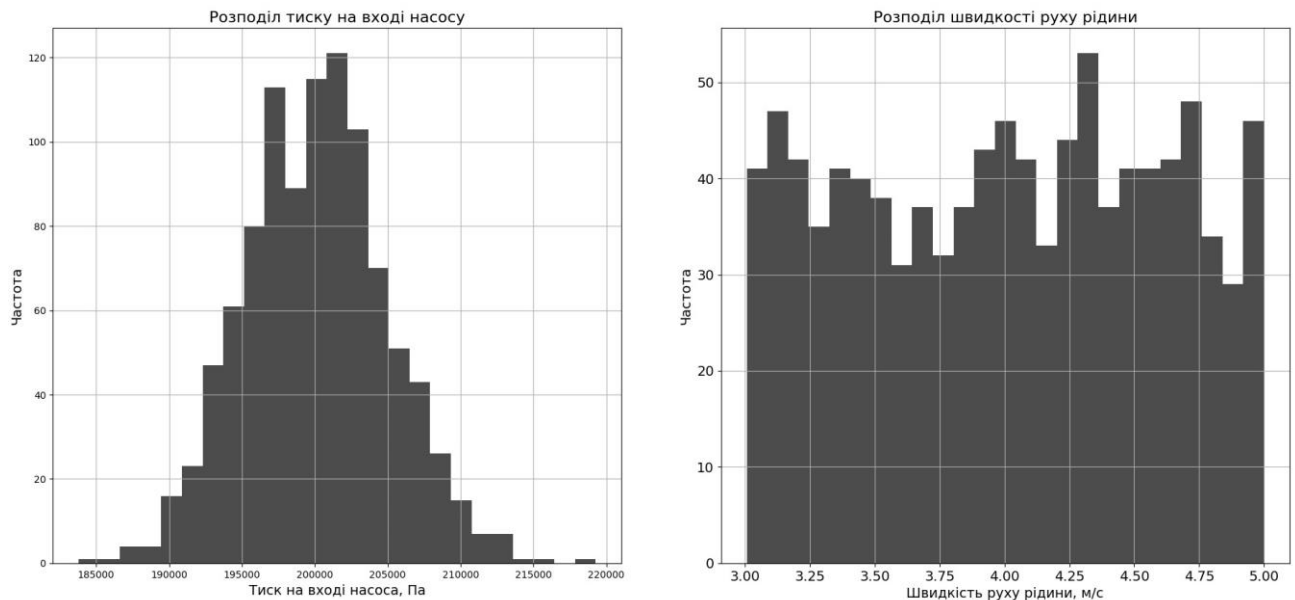


Рисунок 5.1 – Розподіл тиску та швидкості руху рідини

Залежність коефіцієнта кавітації від температури для різних рідин наведено на рисунку 5.2.

На основі отриманих даних проаналізуємо залежність коефіцієнта кавітації (σ) від температури (T) для трьох рідин: води, етанолу та ацетону.

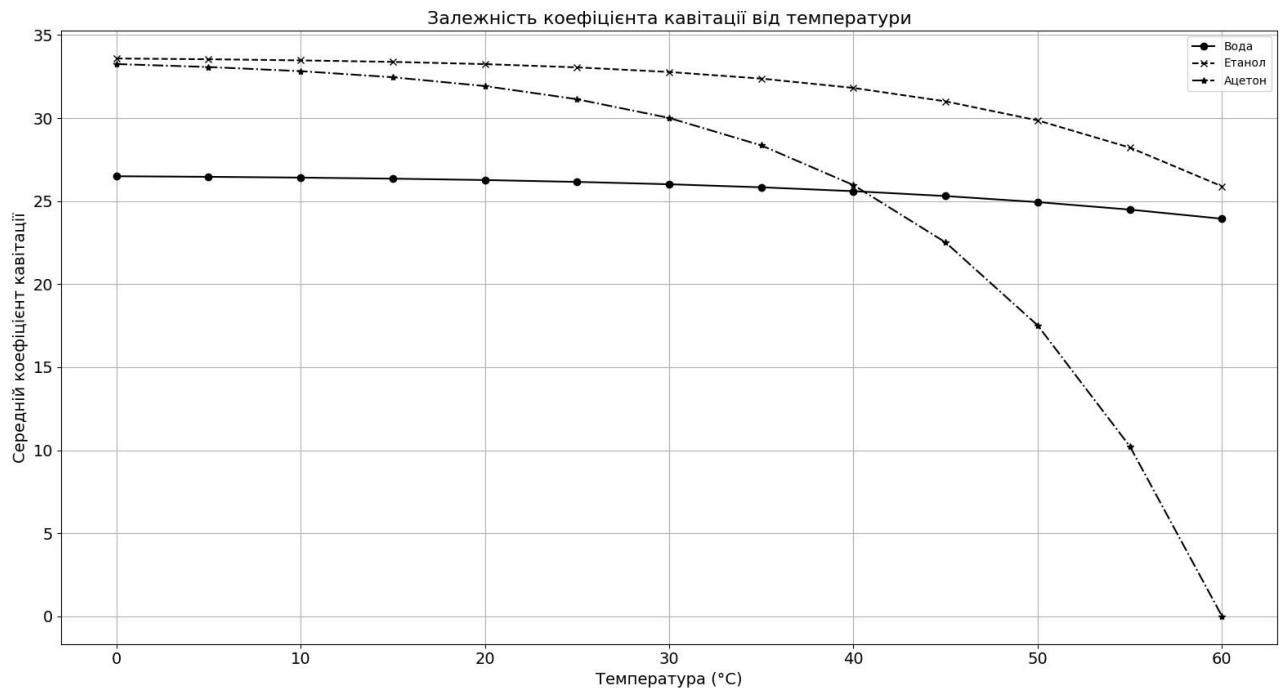


Рисунок 5.2 – Залежність коефіцієнта кавітації від температури для різних рідин

Для всіх трьох рідин (вода, етанол та ацетон) спостерігається чітка тенденція до зниження коефіцієнта кавітації зі зростанням температури. Це пов'язано з тим, що при нагріванні рідини молекули рухаються швидше, що призводить до зменшення сил зчеплення між ними.

Найбільш виражена залежність спостерігається для ацетону. Коефіцієнт кавітації ацетону при 60 °C майже в 33 рази менший, ніж при 0 °C. Це робить ацетон найбільш схильним до кавітації при низьких температурах.

Найменш виражена залежність спостерігається для води. Коефіцієнт кавітації води при 60 °C лише на 19% менший, ніж при 0 °C. Це робить воду найменш схильною до кавітації з трьох досліджених рідин.

Залежність коефіцієнта кавітації від швидкості руху рідини для води, етанолу та ацетону наведено на рисунку 5.3.

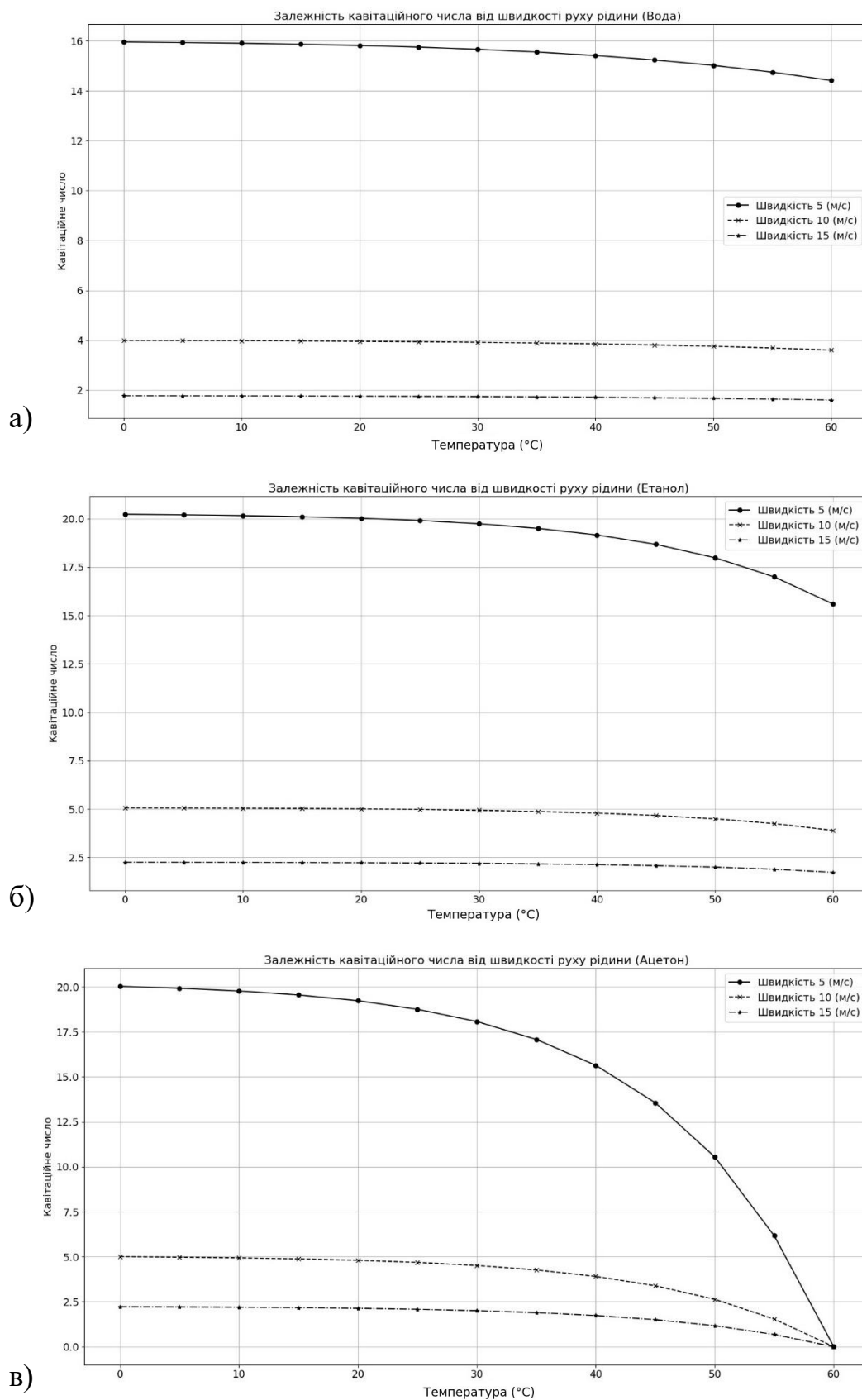


Рисунок 5.3 – Залежність коефіцієнта кавітації від швидкості руху рідини для води (а), етанолу (б) та ацетону (в)

Проаналізуємо залежності коефіцієнта кавітації від швидкості руху рідини.

Коефіцієнт кавітації значно знижується зі зростанням швидкості руху води. Це пов'язано з тим, що при збільшенні швидкості руху води зростає її динамічний тиск, що робить рідину більш стійкою до утворення кавітаційних бульбашок.

Для води кавітаційне число помітно зменшується зі зростанням швидкості руху – приблизно від 16 при 5 м/с до 1,8 при 15 м/с. Водночас у межах температур від 0 °С до 60 °С зміни незначні: криві залишаються майже горизонтальними, що свідчить про слабкий вплив температури. Таким чином, для води швидкість потоку є головним чинником, який визначає початок кавітації, тоді як температура має мінімальне значення.

Для етанолу залежність від швидкості подібна до води, проте вплив температури відчутніший. При 0 °С кавітаційне число вище, ніж у води, але зі зростанням температури воно поступово зменшується, особливо після 30 °С. При 60 °С значення для низької швидкості (5 м/с) падає приблизно до 15,5, що свідчить про підвищену схильність етанолу до кавітації при нагріванні. Це пов'язано з тим, що тиск насиченої пари етанолу значно зростає зі збільшенням температури, полегшуючи утворення парових бульбашок.

Для ацетону спостерігається найсильніша залежність від температури. Початкові значення кавітаційного числа близькі до етанолу, але вже при 20 °С починається помітне зниження, а після 40 °С зміна стає різкою. Приблизно при 60 °С кавітаційне число для швидкості 5 м/с майже досягає нуля, що означає практично повну нестійкість ацетону до кавітації в цих умовах. Така поведінка пояснюється дуже високим тиском насиченої пари ацетону, який при підвищенні температури наближається до робочого тиску рідини.

Висновок до розділу 5

Таким чином, для оцінки можливості виникнення кавітації в насосах розроблено алгоритм, що враховує основні параметри роботи насоса (тиск, температура, об'ємна витрата) для автоматизації розрахунку кавітаційного запасу та виконано його програмну реалізацію на Python.

При збільшенні температури коефіцієнт кавітації σ , зменшується для всіх рідин. Це пояснюється зменшенням сил зчеплення між молекулами при підвищенні температури. Найбільш виражена залежність спостерігається для ацетону, який стає більш схильним до кавітації при низьких температурах, у той час як вода мінімально змінює свій коефіцієнт кавітації при зміні температури.

Друга залежність стосується швидкості руху рідини. При зростанні швидкості руху коефіцієнт кавітації значно знижується для всіх трьох рідин. Водночас температура має слабкий вплив на початок кавітації для води. Для етанолу вплив температури відчутніший. А для ацетону спостерігається найсильніша залежність від температури.

РОЗДІЛ 6

РОЗРАХУНОК КАВІТАЦІЙНОГО ЗАПАСУ НАСОСА

6.1 Існуючі методи розрахунку кавітаційного запасу

Розрахунок кавітаційного запасу насосів має вирішальне значення для забезпечення їх ефективної та безпечної роботи. Кавітація виникає, коли тиск рідини падає нижче тиску її пари, викликаючи утворення і руйнування бульбашок, що призводить до пошкодження компонентів насоса і зниження його продуктивності. Розглянемо ряд існуючих методів розрахунку кавітаційного запасу насосів.

6.1.1 Чистий позитивний напір на всмоктуванні (NPSH)

Чистий позитивний напір на всмоктуванні (надкавітаційний тиск на вході) є ключовим поняттям в роботі насоса. Це мінімальний тиск, необхідний на всмоктувальному патрубку насоса для запобігання кавітації.

Існує два основних аспекти NPSH – наявний (NPSH_a) та необхідний тиск (NPSH_r). NPSH_a – це фактичний тиск, доступний на вході в насос, з урахуванням атмосферного тиску, рівня рідини в резервуарі і втрат тиску у всмоктувальному трубопроводі. NPSH_r – це мінімальний тиск, необхідний насосу для уникнення кавітації в певній робочій точці (необхідний надкавітаційний напір). NPSH_r є характеристикою насоса і надається виробником.

Для належної роботи насоса NPSH_a завжди має бути більшим за NPSH_r. Якщо NPSH_a менше, ніж NPSH_r, виникне кавітація.

На рисунку 6.1 зображено градієнт тиску у відцентровому насосі, що зазнає кавітації: рідина надходить у насос (A); тиск падає нижче тиску пари на робочому колесі (B), тиск зростає, коли рідина виходить на нагнітання (C), а бульбашки конденсуються і руйнуються (D).

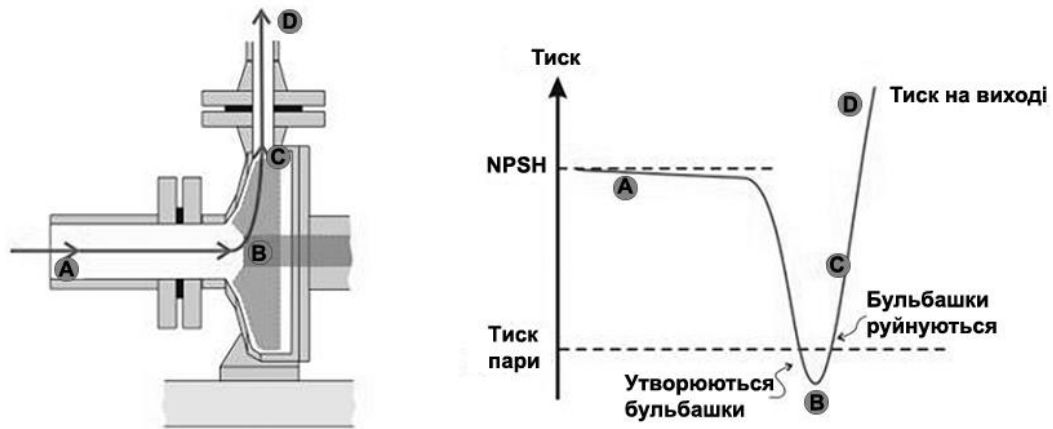


Рисунок 6.1 – Градієнт тиску у відцентровому насосі, що зазнає кавітації [32]

NPSH_a можна розрахувати за допомогою формули (6.1):

$$NPSH_a = A_{т. \text{ тиск}} + \text{Стат. напір} - \text{Втрати на тертя}, \quad (6.1)$$

де $A_{т. \text{ тиск}}$ – це переважаючий атмосферний тиск у місці розташування насоса,

Стат. напір – це відстань по вертикалі між рівнем рідини в резервуарі та центральною лінією входу насоса,

Втрати на тертя – це втрати тиску через тертя у всмоктувальному трубопроводі.

Виробники насосів вказують необхідний чистий позитивний напір на всмоктуванні (NPSH_r) для своїх насосів. Це мінімальний напір, необхідний на вході для запобігання кавітації при певній швидкості потоку.

Щоб забезпечити роботу без кавітації, NPSH_a завжди повинен бути більшим за NPSH_r. Безпечна робоча зона встановлюється шляхом підтримання достатнього кавітаційного запасу (NPSH_a – NPSH_r). Цей запас гарантує, що насос має достатній «запас напору», щоб врахувати коливання умов експлуатації, наприклад, падіння тиску у всмоктувальному трубопроводі або зміни температури рідини.

6.1.2 Криві NPSHr

Виробники насосів надають криві NPSHR, які показують необхідний для насоса напір при різних швидкостях потоку. Порівнюючи NPSHa з кривою NPSHr, що відповідає умовам експлуатації, інженери можуть оцінити ризик кавітації.

Крива NPSHr включає такі елементи – швидкість потоку (вісь X), NPSHr (вісь Y). Швидкість потоку: вісь представляє об'єм рідини, який насос може переміщувати за одиницю часу. NPSHr: вісь показує мінімальний чистий позитивний напір на всмоктуванні, необхідний насосу при певній швидкості потоку для запобігання кавітації. Сама крива зазвичай являє собою лінію або серію точок, що вказують на NPSHr при різних швидкостях потоку.

Робоча точка – це точка на кривій, яка представляє конкретну швидкість потоку і відповідне значення NPSHr, необхідне для насосу. Якщо робоча точка (швидкість потоку і відповідний NPSHr) опускається нижче лінії NPSHa, існує високий ризик виникнення кавітації. В ідеалі робоча точка повинна бути вище лінії NPSHa, що вказує на достатній кавітаційний запас ($NPSHa - NPSHr$) для безпечної роботи.

6.1.3 Емпіричні кореляції

Емпіричні співвідношення були розроблені на основі експериментальних даних для оцінки NPSH, необхідного для різних типів насосів, швидкостей потоку і властивостей рідини. Кореляції забезпечують швидку оцінку кавітаційних полів. Це математичні співвідношення, розроблені на основі великих експериментальних даних. Вони дозволяють швидко оцінити необхідний напір (NPSHr) насоса для різних умов експлуатації.

Існують різні емпіричні кореляції, кожна з яких має свої переваги та недоліки. Деякі поширені приклади включають:

1) кореляції на основі питомої швидкості (N_s). Ці кореляції пов'язують NPSHr з питомою швидкістю насоса (N_s), безрозмірним параметром, який характеризує конструкцію робочого колеса і його кавітаційні характеристики.

Насоси з нижчими питомими швидкостями, як правило, більш схильні до кавітації. Порівнюючи розраховані значення N_s обраного насоса з аналогічними насосами з відомими значеннями $NPSH_r$, інженери можуть оцінити $NPSH_r$ для нового застосування;

2) кореляції на основі точок зародження кавітації (ICP). Ці кореляції зосереджені на умовах потоку, при яких вперше починається кавітація (точка зародження кавітації). Вони пов'язують $NPSH_r$ з такими факторами, як геометрія робочого колеса, кути лопатей і коефіцієнти потоку.

Кожна кореляція зазвичай розробляється для конкретного типу насоса або робочого діапазону. Дуже важливо вибрати кореляцію, яка підходить для насоса і рідини, що розглядається.

6.1.4 Обчислювальна гідродинаміка (CFD)

CFD-симуляції можуть моделювати поле потоку в насосах і прогнозувати області низького тиску, де може виникнути кавітація. Моделювання CFD діє як віртуальна лабораторія для випробування насосів. Воно дозволяє інженерам створити цифрову модель геометрії насоса і змоделювати потік рідини в ньому. Розв'язуючи складні математичні рівняння, що визначають рух рідини, тиск і турбулентність, програмне забезпечення CFD може прогнозувати розподіл тиску. Моделювання CFD може точно визначити області всередині насоса, де тиск падає нижче тиску пари рідини, створюючи зони, схильні до утворення кавітаційних бульбашок.

Також визначається початок виникнення і розвиток кавітації. Ці симуляції можуть візуалізувати початкові стадії кавітації і відстежувати ріст і руйнування кавітаційних бульбашок під час їх проходження через насос.

Змінюючи геометрію насоса віртуально в рамках CFD-моделі, можна проаналізувати, як зміни в конструкції, такі як кути лопатей робочого колеса або форми спіралей, впливають на кавітаційну поведінку.

6.1.5 Випробування прототипу

Випробування прототипу передбачає проведення експериментів на реальних насосних установках для вимірювання NPSH_a в робочих умовах і порівняння його з NPSH_r, наданим виробником. Цей підхід дозволяє отримати реальні дані про кавітаційні характеристики.

6.1.6 Випробування моделей

Масштабні моделі насосів можуть бути протестовані в лабораторних умовах для оцінки їх кавітаційної поведінки. Спостерігаючи за утворенням і руйнуванням парових бульбашок, інженери можуть оцінити кавітаційний резерв і внести зміни в конструкцію, якщо це необхідно.

6.1.7 Теоретичні розрахунки

Різні теоретичні моделі, такі як рівняння Бернуллі і рівняння Ейлера, можуть бути використані для оцінки перепадів тиску і кавітаційних тенденцій всередині насосів. Ці розрахунки часто слугують початковою оцінкою перед проведенням більш детального аналізу.

Рівняння Бернуллі пов'язує тиск, швидкість і висоту у сталому потоці нестисливої рідини. Застосовуючи рівняння Бернуллі вздовж лінії потоку всередині насоса, інженери можуть оцінити падіння тиску на робочому колесі. Якщо розрахунковий тиск падає нижче тиску пари рідини, виникає потенційна загроза кавітації.

Рівняння Ейлера пов'язує зміну напору (енергії) частинок рідини з роботою, яку виконує насос. Воно може бути використане для оцінки теоретичного підвищення напору, що створюється робочим колесом насоса. Порівнюючи це теоретичне підвищення напору з фактичною кривою продуктивності насоса, можна визначити потенційні втрати ефективності, які можуть бути спричинені кавітацією.

6.2 Методика розрахунку кавітаційного запасу насоса

$NPSH_r$ і $NPSH_a$ – два важливі показники для відцентрових насосів. Щоб запобігти кавітації насоса, ефективний допуск на кавітацію насоса має бути більшим за 0,3 м від необхідного запасу кавітації насоса.

Якщо температура середовища, що транспортує, близька до температури кипіння рідини, ефективний запас на кавітацію має бути більшим або дорівнювати 1,3 від необхідного запасу на кавітацію.

Щоб запобігти кавітації в насосі, запас кавітації насосного пристрою (також відомий як ефективний запас кавітації) має бути більшим, ніж у насоса, принаймні, 0,6-1,0 запасу кавітації. Тобто $NPSH_a - NPSH_r = S$ (запас міцності), де запас міцності S становить щонайменше 0,6-1,0 м. Запас кавітації пристрою $NPSH_a$ пов'язаний із висотою встановлення користувача, це має бути запас на кавітацію $NPSH_r$, він пов'язаний із самим насосом. $NPSH_r$ визначається виробником у результаті експериментів із насосом.

Під час випробувань насоса головним критерієм кавітації є максимально допустимий рівень кавітації. Згідно з ДСТУ ГОСТ 6134:2009 [33], цей рівень визначається як добуток критичного рівня кавітації ($NPSH_3$), необхідного для зниження напору насосу на 3 %, на коефіцієнт запасу R' , який може бути в межах від 1,0 до 1,3.

У насосах кавітація виникає в результаті місцевого зниження тиску рідини до тиску кипіння за температури рідини.

Тиск може бути виміряний з різних точок зору. Існує абсолютний тиск, який враховується відносно вакууму і вимірюється за допомогою барометра. Наприклад, нормальний атмосферний тиск 101325 Па – це абсолютний тиск. Надлишковий тиск, з іншого боку, це різниця між абсолютним тиском та атмосферним тиском, який вимірюється манометром.

Повний, статичний і динамічний тиск пов'язані між собою такою залежністю – формула (6.2):

$$\bar{p} = p + \frac{\rho \cdot \omega^2}{2}, \quad (6.2)$$

де \bar{p} – повний тиск, Па,

p – статичний тиск, Па;

$\frac{\rho \cdot \omega^2}{2}$ – динамічний тиск, Па;

ρ - густина рідини, кг/м³;

ω - швидкість рідини, м/с.

Зазвичай надкавітаційний напір (або кавітаційний запас) виражається у метрах рідини. Перетворення тиску з Па в метри стовпа рідини (м) можна виконати за формулою (6.3):

$$H = \frac{p}{\rho \cdot g}, \quad (6.3)$$

де H – тиск у метрах стовпа рідини.

p – тиск. Па.

ρ – густина рідини, кг/м³.

$g \approx 9,81$ м/с² – прискорення вільного падіння.

Таким чином вираз (6.2) отримає наступний вигляд – формула (6.4):

$$\bar{H} = H + \frac{\omega^2}{2 \cdot g}, \quad (6.4)$$

де \bar{H} – повний тиск, м,

H – статичний тиск, м,

$\frac{\omega^2}{2 \cdot g}$ – динамічний тиск, м.

Надкавітаційний тиск на вході (або кавітаційний запас), визначений як NPSH (Net Positive Suction Head), представляє собою різницю між абсолютним тиском рідини у вхідному патрубку насоса та тиском кипіння рідини при відповідній температурі.

Наявний надкавітаційний напір NPSH_a розраховуємо так – формула (6.5):

$$NPSH_a = \overline{H}_{\text{вх}} - H_{\text{кип}}, \quad (6.5)$$

де $\overline{H}_{\text{вх}}$ – повний абсолютний тиск рідини на вході в насос,

$H_{\text{кип}}$ - тиск кипіння рідини (м) при температурі, що дорівнює температурі рідини t .

Представимо NPSH_a наступним чином – формула (6.6):

$$NPSH_a = H_{\text{зов}} + (Z_p - Z_{\text{вх}}) - \Delta H + \frac{\omega^2}{2 \cdot g} - H_{\text{кип}}, \quad (6.6)$$

де $H_{\text{зов}}$ – тиск над поверхнею рідини у вихідному баку (для відкритої системи – атмосферний тиск $H_{\text{атм}}$), м,

$Z_p - Z_{\text{вх}}$ – тиск стовпа рідини, м,

Z_p – позначка поверхні рідини щодо довільно обраної площини відліку Z_0 , м,

$Z_{\text{вх}}$ – відмітка осі вхідного патрубка, м,

ΔH – втрати тиску (напору) при русі рідини об'ємною витратою Q (м³/год) у трубопроводі, м.

Розрахункова схема NPSH_a у відкритому баку наведена на рисунку 6.2.

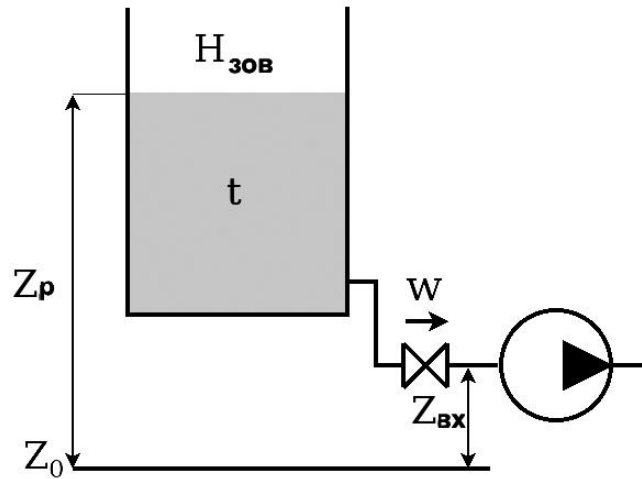


Рисунок 6.2 – Розрахункова схема [34]:

$H_{зоб}$ – тиск над поверхнею рідини, Z_p – позначка поверхні рідини щодо довільно обраної площини відліку Z_0 , м; $Z_{вх}$ – відмітка осі вхідного патрубка; w – швидкість рідини, м/с; t – температура рідини

Однією з ключових властивостей насоса є необхідний надлишковий тиск $NPSH_r$. Якщо $NPSH_r$ дорівнює 5 метрам, це не означає, що для уникнення кавітації перед насосом потрібно мати підпір, вищий за 5 метрів.

Умова безкавітаційної роботи насоса визначається за формулою 6.7:

$$NPSH_r < NPSH_a - 0.5 \text{ м}, \quad (6.7)$$

де 0,5 м – запас.

Запишемо вираз $NPSH_a$ у наступному вигляді – формула 6.8:

$$NPSH_a = NPSH_{at} + (Z_p - Z_{вх}) - \Delta H + \frac{\omega^2}{2 \cdot g}, \quad (6.8)$$

де $NPSH_{at} = H_{зоб} - H_{кип}$ – наявний температурний надкавітаційний напір, різниця між зовнішнім тиском і тиском, за якого закипає рідина температурою t .

Надлишковий тиск перед насосом (NPSHr) залежить від об'єму рідини, який проходить через насос (його продуктивності). При сталому значенні загального тиску перед насосом збільшення об'єму призводить до збільшення швидкості потоку, що в свою чергу зменшує статичний тиск.

Коли статичний тиск у потоці знижується до рівня тиску кипіння при температурі, яка співпадає з температурою рідини, виникає кавітація. При збільшенні об'єму та зменшенні статичного тиску температура кипіння води зменшується, що означає, що вода почне кипіти при меншій температурі. Отже, для уникнення кавітації при збільшенні об'єму рідини, NPSHr також повинен збільшуватися.

Висновок до розділу 6

Розглянуто різні методи розрахунку кавітаційного запасу насосів, що є важливим аспектом для забезпечення безпечної та ефективної роботи насосних систем. Основними параметрами, які визначають кавітаційний запас, є чистий позитивний напір на всмоктуванні (NPSHa) та необхідний кавітаційний запас (NPSHr). Кавітаційний запас, як різниця між цими двома величинами, повинен бути достатнім, щоб гарантувати надійну роботу насоса без кавітації.

Існує кілька методів розрахунку кавітаційного запасу, включаючи емпіричні кореляції, обчислювальну гідродинаміку (CFD), випробування прототипів та теоретичні розрахунки. Вибір методу залежить від конкретного типу насоса, рідини та умов експлуатації. Правильний вибір методу розрахунку є ключовим для підбору насоса, який відповідатиме вимогам конкретного застосування, та для уникнення негативних наслідків кавітації, таких як пошкодження насоса, зниження його продуктивності та шум.

РОЗДІЛ 7

АЛГОРИТМ ТА ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРАХУНКУ КАВІТАЦІЙНОГО ЗАПАСУ НАСОСА

7.1 Алгоритм розрахунку кавітаційного запасу (NPSH)

Розрахунок кавітаційного запасу (NPSH) включає декілька етапів.

1. Визначення потоку рідини.

Обчислимо швидкість потоку рідини в трубопроводі. Для цього використовують витрату рідини (об'єм, який проходить через трубу за одиницю часу) та діаметр труби. Розраховують середню швидкість потоку, враховуючи перетин труби.

2. Розрахунок втрат тиску в трубопроводі.

Розглянемо втрати тиску, які виникають через тертя рідини об стінки труби та місцеві опори (наприклад, вигини трубопроводу, фітинги). Ці втрати залежать від швидкості потоку, діаметру труби, довжини трубопроводу та коефіцієнта тертя.

3. Обчислення тиску на вході в насос.

Вхідний тиск визначимо, додаючи атмосферний тиск до тиску стовпа рідини над насосом (якщо є висота підйому) та віднімаючи втрати тиску у трубопроводі.

4. Розрахунок тиску насичення.

Тиск насичення обчислимо для рідини при певній температурі. Це тиск, при якому рідина починає кипіти при даній температурі.

5. Врахування додаткових факторів.

Додатково врахуємо властивості рідини, такі як в'язкість та щільність, які будуть впливати на втрати тиску та загальну поведінку потоку.

6. Визначення кавітаційного запасу.

Кавітаційний запас визначимо як різницю між абсолютним тиском рідини на вході в насос і тиском, при якому рідина починає кавітацію (тобто,

утворюються парові бульбашки). Для цього обчислюють тиск на вході в насос, враховуючи втрати тиску у трубопроводі, та порівнюють його з тиском насичення (який залежить від температури рідини).

Для реалізації названих етапів розрахунку обрано мову програмування Python.

Функціональна реалізація алгоритму наступна.

1. Розрахунок перепаду тиску через тертя:

`calc_dH()` – розраховує перепад тиску через тертя на ділянці труби;

`calc_frc_w()` – розраховує коефіцієнт тертя;

`calc_lambda()` – розраховує коефіцієнт тертя за допомогою квадратичного наближення;

`calc_w()` – розраховує швидкість потоку рідини в трубі;

`calc_Re()` – розраховує число Рейнольдса;

`fRe_lowmarg_pipe()` – надає мінімальне число Рейнольдса для ламінарного потоку в трубі.

2. Розрахунок перепаду тиску в коліні:

`elb_calc_dH()` – розраховує перепад тиску в коліні;

`elb_calc_grc_w()` – розраховує загальний коефіцієнт опору для коліна;

`elb_calc_frc_w()` – розраховує компонент опору тертя коефіцієнта опору;

`elb_calc_lrc_w()` – розраховує локальний компонент опору коефіцієнта опору.

3. Розрахунок перепаду тиску елемента Kv:

`Kv_calc_lrc()` – розраховує локальний коефіцієнт опору для елемента Kv;

`Kv_calc_dH()` – розраховує перепад тиску в елементі Kv;

`Kv_calc_dH_w()` – розраховує перепад тиску в елементі Kv за допомогою локального коефіцієнта опору;

`lrc_calc_dH_w()` – розраховує перепад тиску за допомогою локального коефіцієнта опору;

`lrc_calc_dH()` – розраховує перепад тиску в елементі з заданим локальним коефіцієнтом опору.

4. Розрахунок перепаду тиску в трубопроводі:

`rpln_calc_dH()` – розраховує загальний перепад тиску в трубопроводі, що складається з різних елементів;

`rpln_get_defs()` – надає значення параметрів за замовчуванням для елементів трубопроводу.

5. Властивості пари та крива насичення:

`calc_ws_dvisc()` – розраховує динамічну в'язкість пари за заданою температурою та щільністю;

`p_T()` – розраховує тиск при заданій температурі;

`p_t()` – розраховує тиск при заданій температурі за Цельсієм;

`T_p()` – розраховує температуру при заданому тиску;

`t_p()` – розраховує температуру за Цельсієм при заданому тиску.

6. Перевірка параметрів (продовження):

`p_in()` – перевіряє, чи тиск знаходиться в допустимому діапазоні;

`T_in()` – перевіряє, чи температура знаходиться в допустимому діапазоні;

`t_in()` – перевіряє, чи температура за Цельсієм знаходиться в допустимому діапазоні;

`x_in()` – перевіряє, чи частка пари (x) знаходиться в допустимому діапазоні (від 0 до 1);

`Tr_in()` – перевіряє, чи комбінація температури та тиску є допустимою;

`tr_in()` – перевіряє, чи комбінація температури за Цельсієм та тиску є допустимою;

`ph_in()` – перевіряє, чи комбінація тиску та ентальпії є допустимою;

`ps_in()` – перевіряє, чи комбінація тиску та ентропії є допустимою.

7. Регіональні розрахунки властивостей:

`get_T_edges()` – надає нижню та верхню межі температури для заданого тиску;

`_props_Tr()` – розраховує термодинамічні властивості за заданою температурою та тиском.

8. Визначення кавітаційного запасу:

`calc_NPSH` – розраховує кавітаційний запас.

Розглянемо детальніше перші етапи програмної реалізації.

7.2 Програмна реалізація розрахунку

Опис етапів задання вхідних даних в скрипті для розрахунку гідравлічних втрат тиску включає кілька кроків.

1. Визначення параметрів системи.

Спочатку потрібно визначити основні параметри системи, такі як витрата (Q) і стандартні характеристики (`defs`), які можуть включати в'язкість, густину рідини та інші гідравлічні параметри – лістинг 7.1.

Лістинг 7.1 – Визначення параметрів системи

```
Q = 10 # Витрата в м3/год
defs = {
    'density': 1000, # Густина рідини в кг/м3
    'viscosity': 1e-3 # В'язкість рідини в Па*с
}
```

кінець лістингу 7.1

Також необхідно ввести наступні дані:

p : тиск над поверхнею води (гранично низький атмосферний тиск), Па,

t : температура води, °C,

z_s : висотна позначка поверхні води в баку, м,

z_p : висотна позначка осі вхідного патрубку насоса, м,

D : внутрішній діаметр вхідного трубопроводу, м,

D_p : внутрішній діаметр вхідного патрубка насоса, м.

2. Опис елементів трубопроводу.

Опис елементів трубопроводу потрібен для розрахунку гідравлічних втрат тиску в системі трубопроводу. Втрати тиску є важливою характеристикою при проектуванні та експлуатації трубопровідних систем, оскільки вони впливають на ефективність транспортування рідини або газу, а також на вибір насосів і інших компонентів системи.

Для опису елементів трубопроводу визначаються всі елементи трубопроводу, які будуть використовуватися (труби, відводи, фітинги, засувки тощо). Для кожного елемента визначаються його характеристики (діаметр, довжина, кут відводу, коефіцієнт локального опору тощо). Кожен елемент описується за допомогою словника Python, де вказуються його тип та необхідні параметри. Елементи збираються в список, який передається у функцію розрахунку.

Спеціальна функція проходить через всі елементи списку, розраховує втрати тиску для кожного з них та сумує ці втрати. Результат розрахунку дає загальні втрати тиску в системі при заданому потоці.

Приведемо основні елементи трубопроводу та їх опис.

– Вхід у трубопровід:

```
enter = {'type': 'lrc', 'value': 0.5},
```

type: 'lrc' (local resistance coefficient) – локальний коефіцієнт опору,

value: 0.5 – значення локального коефіцієнта опору для входу.

– Пряма труба:

```
pipe = {'type': 'pipe', 'qty': 6} # для DN80,
```

```
pipe40 = {'type': 'pipe', 'D':  $D_p$ , 'qty': 0.25} # для DN40,
```

type: 'pipe' – труба,

qty: 6 – кількість труб (наприклад, 6 метрів),

D (необов'язково): D_p – діаметр труби (для труби DN40).

– Кутовий відвід 90 градусів:

```
elbow = {'type': 'elbow', 'qty': 4},
```

type: 'elbow' – кутовий відвід,

qty: 4 – кількість відводів.

– Кутовий відвід 45 градусів:

```
elbow45 = {'type': 'elbow', 'deg': 45, 'qty': 2},
```

type: 'elbow' – кутовий відвід,

deg: 45 – кут відводу в градусах,

qty: 2 – кількість відводів.

– Засувка:

```
valve = {'type': 'lrc', 'value': 0.05},
```

type: 'lrc' (local resistance coefficient) – локальний коефіцієнт опору,

value: 0.05 – значення локального коефіцієнта опору для засувки.

– Вихід з трубопроводу:

```
exit = {'type': 'lrc', 'value': 1, 'D': D_p},
```

type: 'lrc' (local resistance coefficient) – локальний коефіцієнт опору,

value: 1 – значення локального коефіцієнта опору для виходу,

D: D_p – діаметр труби на виході.

– Збірка всіх елементів у список.

Усі елементи збираються в список `elems` для подальшого розрахунку:

```
elems = [enter, pipe, elbow, elbow45, valve, pipe40, exit].
```

Функція для розрахунку втрат тиску `ppln_calc_dH` використовує витрату Q

і список елементів `elems`:

```
dHs = ppln_calc_dH(Q, elems, **defs).
```

Приклад розрахунку втрат тиску наведено в лістингу 7.2.

Лістинг 7.2 – Приклад розрахунку втрат тиску

```
Q = 10. # об'ємна витрата, м3/год
```

```
enter = {'type': 'lrc', 'value': 0.5} # вхід у трубопровід
```

```

pipe = {'type': 'pipe', 'qty': 6} # труба DN80
elbow = {'type': 'elbow', 'qty': 4} # відведення 90 градусів
elbow45 = {'type': 'elbow', 'deg': 45, 'qty': 2} # відведення 45 градусів
valve = {'type': 'lrc', 'value': 0.05} # засувка фланцева
pipe40 = {'type': 'pipe', 'D': D_p, 'qty': 0.25} # труба DN40
exit = {'type': 'lrc', 'value': 1, 'D': D_p} # втрати з вихідною швидкістю
elems = [enter, pipe, elbow, elbow45, valve, pipe40, exit]
dHs = ppln_calc_dH(Q, elems, **defs) # втрати тиску на кожній ділянці
[0.007053085674501933, 0.02948566819409823, 0.0263979868482122,
0.007729500539364892, 0.0007053085674501934, 0.0540900501356391,
0.24912918035832818]

```

Сумарне значення втрат, м – 0.375

кінець лістингу 7.2

Кавітаційний запас міцності (NPSH) розраховується як різниця між сумою некерованих втрат тиску та гідростатичного тиску води та тиском кипіння води при заданій температурі. Для розрахунку використовуємо функцією calc_NPSH. Вхідні параметри для розрахунку вказані у змінних z_s, z_p, t, p, Q та D, які відповідають висоті рівня рідини в баку, висоті осі вхідного патрубку насоса, температурі води, тиску над поверхнею води, об'ємній витраті та діаметру вхідного трубопроводу відповідно.

Фрагмент програмної реалізації алгоритму розрахунку кавітаційного запасу представлено у Додатку Б.

Результати роботи програми розрахунку кавітаційного запасу насосу наведено на рисунку 7.1.

```

Розрахунок кавітаційного запасу насоса
-----
Введені дані
Тиск над поверхнею води: 96258.75 Па
Температура води: 90 С
Висотна позначка поверхні води в баку: 0.6 м
Висотна позначка осі вхідного патрубку насоса: -1.33 м
Об'ємна витрата: 10.0 м3/год
Внутрішній діаметр вхідного трубопроводу: 0.082 м
Внутрішній діаметр вхідного патрубку насоса: 0.04 м

Елементи трубопроводу
Вхід у трубовід: {'type': 'lrc', 'value': 0.5, 'D': 0.082, 'qty': 1}
Труба DN80: {'type': 'pipe', 'qty': 6, 'D': 0.082, 'Delta': 0.0003, 'kvisc': 3.254676957062171e-07}
Відведення 90 градусів: {'type': 'elbow', 'qty': 4, 'D': 0.082, 'deg': 90, 'RD': 1.5, 'Delta': 0.0003, 'kvisc': 3.254676957062171e-07}
Відведення 45 градусів: {'type': 'elbow', 'deg': 45, 'qty': 2, 'D': 0.082, 'RD': 1.5, 'Delta': 0.0003, 'kvisc': 3.254676957062171e-07}
Засувка фланцева: {'type': 'lrc', 'value': 0.05, 'D': 0.082, 'qty': 1}
Труба DN40: {'type': 'pipe', 'D': 0.04, 'qty': 0.25, 'Delta': 0.0003, 'kvisc': 3.254676957062171e-07}
Втрати з вихідною швидкістю: {'type': 'lrc', 'value': 1, 'D': 0.04, 'qty': 1}
-----
Розрахунок кавітаційного запасу, м 4.559129372819385
Необхідний надкавітаційний напір на вході NPSHR , м 4.059129372819385

```

Рисунок 7.1 – Результати роботи програми розрахунку кавітаційного запасу насоса

Висновок до розділу 7

Представлено алгоритм та програмна реалізація розрахунку кавітаційного запасу насоса. Даний код відзначається функціональністю, що дозволяє виконувати широкий спектр гідравлічних розрахунків. Наявні інструментів для роботи з парою, включаючи обробку властивостей пари та кривих насичення. Це робить представлений код корисним для завдань, пов'язаних з роботою з водяною парою.

Крім того, код відрізняється модульністю, що сприяє зручності використання та можливості його модифікації для відповідності специфічним потребам. Наявність функцій перевірки параметрів гарантує правильність введених даних, що підвищує надійність та зручність використання програмного забезпечення.

РОЗДІЛ 8

ВПЛИВ ЗМІННИХ ПАРАМЕТРІВ НА КАВІТАЦІЙНИЙ ЗАПАС

Використаємо отриманий автоматизований розрахунок кавітаційного запасу насоса для аналізу впливу змінних параметрів, таких як об'ємна витрата рідини, температура, висота рівня рідини в баку та частин стандартного атмосферного тиску, на кавітаційний запас у насосних системах.

Задамо наступні вхідні дані:

– $p = 101325 \cdot 0,95$ Па – тиск над поверхнею води (гранично низький атмосферний тиск),

– $t = 90$ °С – температура води,

– $z_s = 0,6$ м – висотна позначка поверхні води в баку (мінімальний рівень),

– $z_p = -1,33$ м – висотна позначка осі вхідного патрубку насоса,

– $D = 0,082$ м - внутрішній діаметр вхідного трубопроводу,

– $D_p = 0,04$ м - внутрішній діаметр вхідного патрубку насоса.

Після задання вхідних параметрів використаємо автоматизований розрахунок кавітаційного запасу насоса для аналізу впливу змінних параметрів.

Для дослідження впливу об'ємної витрати рідини будемо змінювати значення Q (об'ємна витрата) від 10 м³/год до 80 м³/год і спостерігати, як змінюється кавітаційний запас при цьому.

Залежність кавітаційного запасу та надкавітаційного напору від об'ємної витрати при температурі води $t = 90$ °С наведена на рисунку 8.1.

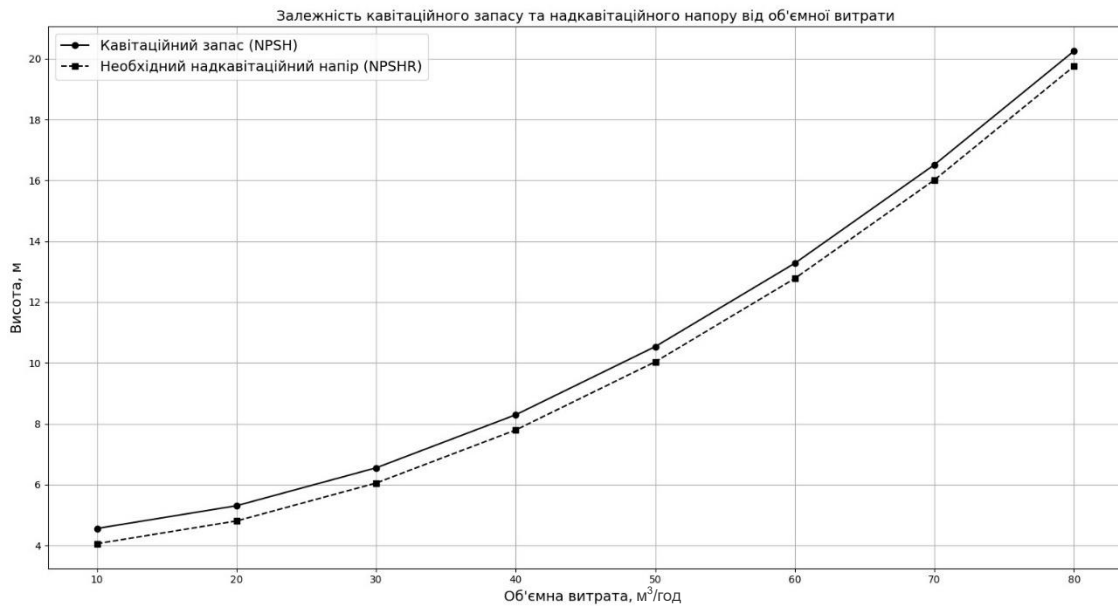


Рисунок 8.1 – Залежність кавітаційного запасу та надкавітаційного напору від об'ємної витрати (при температурі води $t = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Аналізуючи отримані дані, можна зробити декілька висновків про кавітаційний запас (NPSH) та необхідний надкавітаційний напір (NPSHR) в залежності від об'ємної витрати.

При збільшенні об'ємної витрати від $10\text{ м}^3/\text{год}$ до $80\text{ м}^3/\text{год}$, значення кавітаційного запасу (NPSH) зростає з $4,56\text{ м}$ до $20,25\text{ м}$. Це вказує на те, що з підвищенням об'ємної витрати насосу потрібно більше енергії для підтримки належного запасу кавітації, що може бути пов'язано з різними факторами, такими як підвищення швидкості потоку та зниження тиску в насосі.

Аналогічно до NPSH, значення NPSHR зростає з $4,06\text{ м}$ до $19,75\text{ м}$ при збільшенні об'ємної витрати від $10\text{ м}^3/\text{год}$ до $80\text{ м}^3/\text{год}$. Це свідчить про те, що для забезпечення ефективної роботи насоса та запобігання кавітації, потрібен вищий надкавітаційний напір на вході при збільшенні об'ємної витрати.

Збільшення NPSH та NPSHR при зростанні об'ємної витрати має нелінійний характер. Це можна помітити за швидким збільшенням значень при більших об'ємних витратах.

Криві NPSH та NPSHR демонструють зростання, яке можна приблизно описати як квадратичну або степеневу залежність. Початкові значення збільшуються повільніше, але зі збільшенням витрати приріст стає все більшим.

На рисунку 8.2 наведена залежність кавітаційного запасу та надкавітаційного напору від температури при об'ємній витраті $Q = 10 \text{ м}^3/\text{год}$.

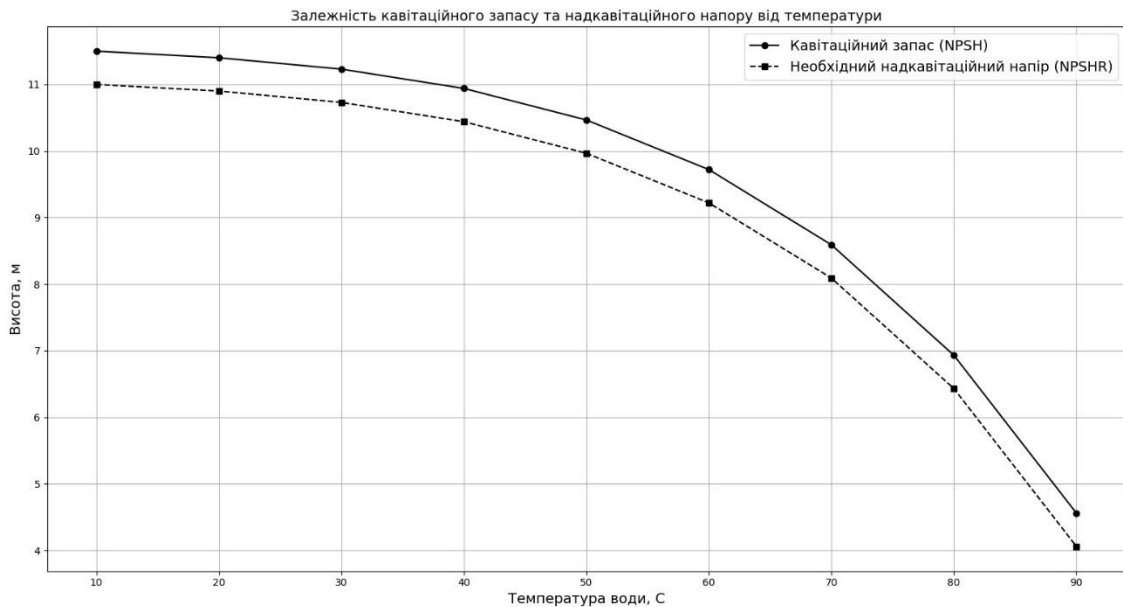


Рисунок 8.2 – Залежність кавітаційного запасу та надкавітаційного напору від температури (при об'ємній витраті $Q = 10 \text{ м}^3/\text{год}$)

Аналізуючи наведені залежності кавітаційного запасу (NPSH) та необхідного надкавітаційного напору на вході (NPSHR) від температури, можна виявити такі взаємозв'язки.

Підвищення температури води призводить до зменшення як кавітаційного запасу, так і необхідного надкавітаційного напору на вході. Це пов'язано зі змінами фізичних властивостей рідини – зокрема, зі зростанням тиску насиченої пари при підвищенні температури. Існує систематичне зменшення значень NPSH та NPSHR із підвищенням температури на кожному кроці.

Зменшення цих величин при підвищенні температури впливає на ефективність роботи насоса, оскільки підвищується ризик кавітації та звужується діапазон його стабільної роботи.

Криві NPSH та NPSHR мають нелінійний спадний характер, який відображає зменшення кавітаційного запасу із підвищенням температури. Форма цих кривих може наближено відповідати експоненційному або логарифмічному закону.

На рисунку 8.3 наведена залежність кавітаційного запасу та надкавітаційного напору від висоти позначки поверхні води в баку при об'ємній витраті $Q = 10 \text{ м}^3/\text{год}$ і температурі води $t = 90 \text{ }^\circ\text{C}$.

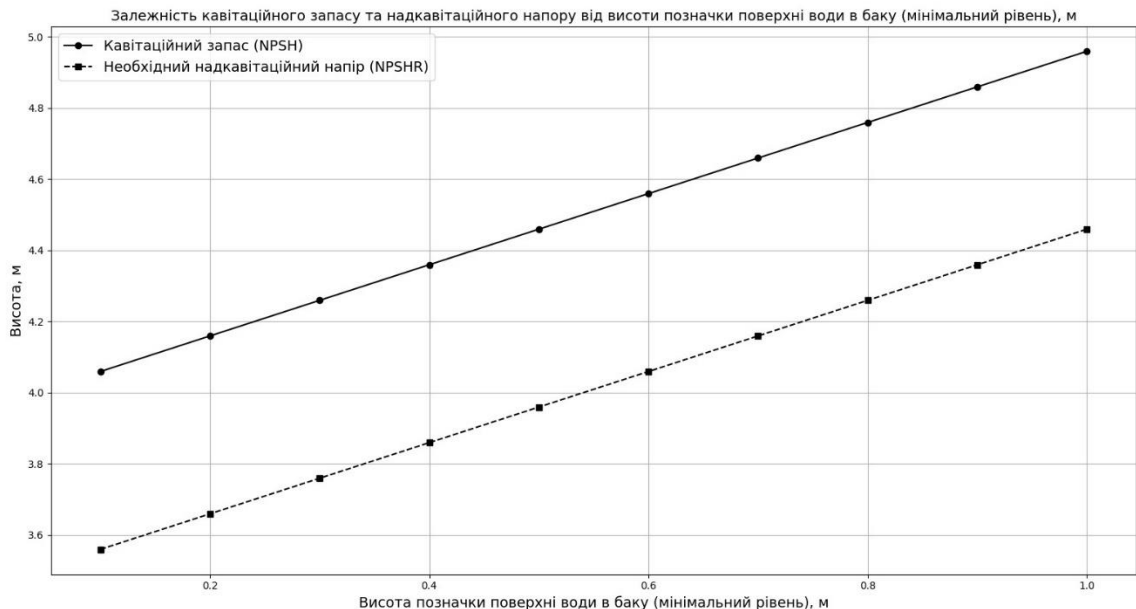


Рисунок 8.3 – Залежність кавітаційного запасу та надкавітаційного напору від висоти позначки поверхні води в баку (мінімальний рівень), (при об'ємній витраті $Q = 10 \text{ м}^3/\text{год}$, температурі води $t = 90 \text{ }^\circ\text{C}$)

Дані показують залежність кавітаційного запасу (NPSH) та необхідного надкавітаційного напору на вході (NPSHR) від висоти позначки поверхні води в баку.

NPSH зростає зі збільшенням висоти позначки поверхні води в баку. Це пов'язано зі збільшенням гідростатичного тиску на вході насоса.

NPSHR також збільшується зі зростанням висоти позначки поверхні води в баку. Це свідчить про те, що для підтримання оптимальної роботи насосної системи необхідно забезпечити достатній надлишковий напір на вході.

Графіки залежності NPSH та NPSHR мають тенденцію до лінійного зростання зі збільшенням висоти позначки поверхні води в баку. Форми кривих NPSH та NPSHR може бути описана як пряма лінія з позитивним нахилом.

На рисунку 8.4 наведена залежність кавітаційного запасу та надкавітаційного напору від частин стандартного атмосферного тиску при об'ємній витраті $Q = 10 \text{ м}^3/\text{год}$ і температурі води $t = 90 \text{ °C}$.

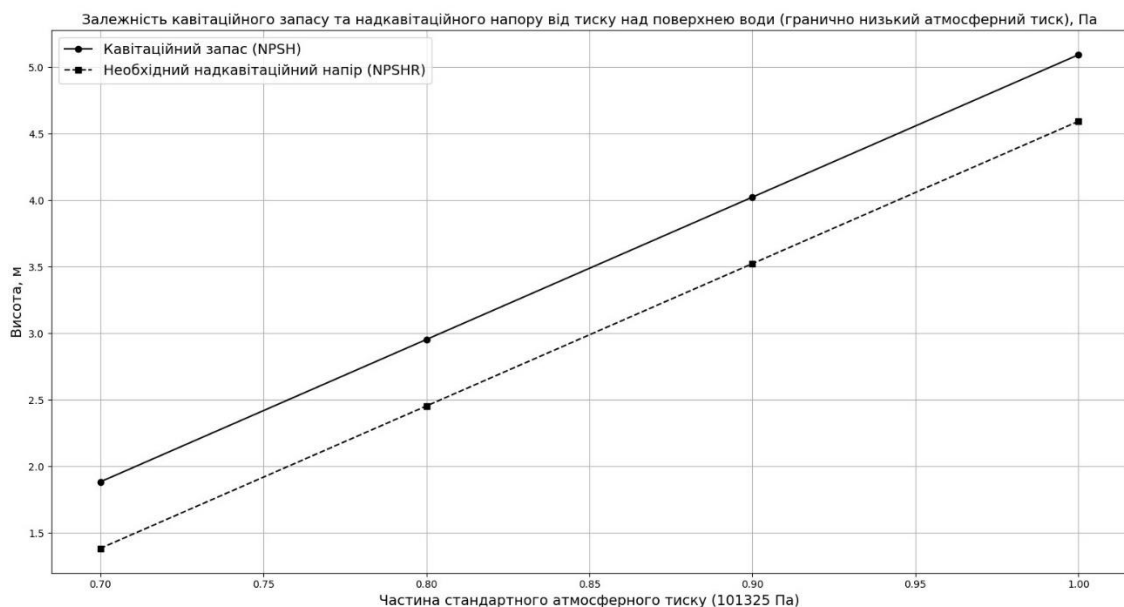


Рисунок 8.4 – Залежність кавітаційного запасу та надкавітаційного напору від частин стандартного атмосферного тиску (при об'ємній витраті $Q = 10 \text{ м}^3/\text{год}$, температурі води $t = 90 \text{ °C}$)

NPSH зменшується зі зменшенням значень частин стандартного атмосферного тиску. Це може бути пов'язано зі зменшенням гідростатичного тиску на вході насоса при зниженні атмосферного тиску.

Аналогічно, значення NPSHR також зменшується зі зменшенням частин стандартного атмосферного тиску. Це свідчить про те, що для підтримання оптимальної роботи насосної системи необхідно менше надлишкового напору на вході при зниженні атмосферного тиску.

Висновок до розділу 8

На кавітаційний запас (NPSH) та необхідний надкавітаційний напір на вході (NPSHR) насосної системи мають вплив ряд факторів:

– збільшення об'ємної витрати: підвищення об'ємної витрати призводить до збільшення як NPSH, так і NPSHR. Це означає, що для підтримки належного запасу кавітації та ефективної роботи насоса потрібно більше енергії. Залежність має нелінійний характер зі швидким зростанням значень при більших об'ємних витратах;

– зниження температури: зменшення температури рідини призводить до зменшення як NPSH, так і NPSHR. Зменшення NPSH та NPSHR зменшує ризик кавітації та розширює діапазон роботи насоса при низьких температурах;

– висота рівня рідини в баку: зі зростанням висоти рівня рідини в баку збільшується як NPSH, так і NPSHR. Це пов'язано зі збільшенням гідростатичного тиску на вході насоса, що впливає на ефективність роботи системи;

– атмосферний тиск: зменшення атмосферного тиску призводить до зменшення як NPSH, так і NPSHR. Це пов'язано зі зменшенням гідростатичного тиску на вході насоса при зниженні атмосферного тиску.

Загалом, аналіз цих факторів допомагає краще розуміти умови, які впливають на ефективність та надійність роботи насосних систем. Врахування цих факторів при проектуванні та експлуатації системи дозволяє підтримувати оптимальну роботу насосів і запобігати проблемам, таким як кавітація, що може призвести до збоїв у системі.

ВИСНОВКИ

Головною метою кваліфікаційної роботи є розробка програмного забезпечення автоматизації розрахунку кавітаційного запасу насоса для забезпечення надійності системи.

Для досягнення цієї мети проведено детальне вивчення фізичних процесів, що призводять до кавітації. Розглянуто умови виникнення кавітації, зокрема значення тиску пари рідини та вплив температури. Визначено, що кавітація виникає, коли місцевий тиск падає нижче тиску насиченої пари рідини, що призводить до утворення кавітаційних бульбашок.

Складено огляд класифікації насосів, включаючи динамічні (відцентрові) та об'ємні (поршневі) насоси. Визначено, що класифікація насосів відбувається за різними критеріями, такими як принцип роботи та конструктивні особливості. Описано основні характеристики та принципи роботи кожного типу насосів. Також розглянуто специфіку їх застосування у різних галузях.

Описано сучасні методи оцінки кавітації, такі як використання коефіцієнта кавітаційного запасу (NPSH – Net Positive Suction Head) та чисельне моделювання. Методи виявлення кавітації включають аналітичні та інженерні підходи, кожен з яких має свої переваги та обмеження. Проаналізовано практичні підходи до визначення NPSH. Виявлено, що кавітація на відцентрові насоси може мати серйозні наслідки, такі як пошкодження компонентів насоса, зниження продуктивності, підвищення витрат на обслуговування, шум та вібрація, нестабільна робота, зниження ефективності, складнощі у проектуванні та негативний економічний та екологічний вплив.

Обрано мову програмування Python через її популярність в інженерних розрахунках і наявність широкого спектру бібліотек. Широкий спектр бібліотек у Python дозволяє виконувати різноманітні завдання, включаючи наукові обчислення (NumPy, SciPy), обробку даних (SymPy, Pandas), візуалізацію даних (Matplotlib, OpenCV), машинне навчання (TensorFlow, PyTorch) та інші.

Для оцінки можливості виникнення кавітації в насосах розроблено алгоритм, що враховує основні параметри роботи насоса (тиск, температура, об'ємна витрата) для автоматизації розрахунку коефіцієнта кавітації та виконано його програмну реалізацію на Python.

Для визначення залежності коефіцієнта кавітації від вхідних параметрів для моделювання обрано воду, етанол та ацетон. Для цих рідин проаналізовано залежність коефіцієнта кавітації від температури та від швидкості руху рідини. Визначено, що при збільшенні температури коефіцієнт кавітації зменшується для всіх рідин. Це пояснюється зменшенням сил зчеплення між молекулами при підвищенні температури. Найбільш виражена залежність спостерігається для ацетону, який стає більш схильним до кавітації при низьких температурах, у той час як вода мінімально змінює свій коефіцієнт кавітації при зміні температури рідини. При зростанні швидкості руху коефіцієнт кавітації значно знижується для всіх трьох рідин. При зростанні швидкості руху коефіцієнт кавітації значно знижується для всіх трьох рідин. Водночас температура має слабкий вплив на початок кавітації для води. Для етанолу вплив температури відчутніший. А для ацетону спостерігається найсильніша залежність від температури.

Розглянуто різні методи розрахунку кавітаційного запасу насосів, що є важливим аспектом для забезпечення безпечної та ефективної роботи насосних систем. Встановлено, що основними параметрами, які визначають кавітаційний запас, є чистий позитивний напір на всмоктуванні (NPSHa) та необхідний кавітаційний запас (NPSHr). Кавітаційний запас, як різниця між цими двома величинами, повинен бути достатнім, щоб гарантувати надійну роботу насоса без кавітації. Правильний вибір методу розрахунку є ключовим для підбору насоса, який відповідатиме вимогам конкретного застосування, та для уникнення негативних наслідків кавітації, таких як пошкодження насоса, зниження його продуктивності та шум.

Представлено алгоритм та виконана програмна реалізація розрахунку кавітаційного запасу насоса. Даний код відзначається функціональністю, що

дозволяє виконувати широкий спектр гідравлічних розрахунків. Наявні інструментів для роботи з парою, включаючи обробку властивостей пари та кривих насичення. Це робить представлений код корисним для завдань, пов'язаних з роботою з водяною парою. Крім того, код відрізняється модульністю, що сприяє зручності використання та можливості його модифікації для відповідності специфічним потребам. Наявність функцій перевірки параметрів гарантує правильність введених даних, що підвищує надійність та зручність використання програмного забезпечення.

Отриманий автоматизований розрахунок кавітаційного запасу насоса використано для дослідження впливу змінних параметрів на кавітаційний запас у насосних системах.

Виявлено, що на кавітаційний запас (NPSH) та необхідний надкавітаційний напір на вході (NPSHR) насосної системи мають вплив ряд факторів: збільшення об'ємної витрати, зниження температури, висота рівня рідини в баку, атмосферний тиск. Проведено серію симуляцій з різними параметрами. Результати було проаналізовано та подано у вигляді графіків для наочного представлення. Аналіз цих факторів допомагає краще розуміти умови, які впливають на ефективність та надійність роботи насосних систем. Врахування цих факторів при проектуванні та експлуатації системи дозволяє підтримувати оптимальну роботу насосів і запобігати проблемам, таким як кавітація, що може призвести до збоїв у системі.

Отримане програмне забезпечення може бути використане для оцінки кавітаційного ризику в насосах, підбору насоса з відповідними характеристиками, створення систем з гарантованою надійністю.

Таким чином, результати дослідження показують, що розроблене програмне забезпечення є ефективним інструментом для автоматизації розрахунку кавітаційного запасу насосів. Використання Python та відповідних бібліотек дозволило створити зручну у використанні програму, яка здатна швидко та точно оцінювати кавітаційний запас на основі заданих параметрів. Це

програмне забезпечення може стати одним з компонентів у процесі проектування та експлуатації насосних систем, забезпечуючи певну надійність та ефективність роботи. У подальшому можливо розширити функціонал програми, інтегрувати її з іншими інженерними системами та провести додаткові тестування в реальних умовах для покращення її точності та надійності.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Taseidifar M., Antony J.J., Pashley R. Prevention of Cavitation in Propellers. *Substantia*. 2021, № 4, P.109-117.
2. Experimental and numerical investigations of tip vortex cavitation for the propeller of a research vessel, «The Princess Royal». URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029801820308477> (дата звернення: 15.07.2025).
3. Beer-brewing powered by controlled hydrodynamic cavitation: Theory and real-scale experiments. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652616320248> (дата звернення: 15.07.2025).
4. Use of hydrodynamic cavitation in (waste) water treatment. Theory and real-scale experiments. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350417715300535> (дата звернення: 15.07.2025).
5. Biomedical device prototype based on small scale hydrodynamic cavitation. URL: https://www.researchgate.net/publication/323645725_Biomedical_device_prototype_based_on_small_scale_hydrodynamic_cavitation (дата звернення: 15.07.2025).
6. Application of Cavitation in Oil Processing: An Overview of Mechanisms and Results of Treatment. URL: https://www.researchgate.net/publication/356280255_Application_of_Cavitation_in_Oil_Processing_An_Overview_of_Mechanisms_and_Results_of_Treatment (дата звернення: 15.07.2025).
7. Application of cavitational reactors for water disinfection: Current status and path forward. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479707002290> (дата звернення: 15.07.2025).
8. Атмосфера і охорона. URL: <https://svitppt.com.ua/ekologiya/atmosfera-i-ohorona.html> (дата звернення: 15.07.2025).

9. Optical Cavitation in Non-Absorbent Solutions Using a Continuous-Wave Laser via Optical Fiber. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S003039922200487X> (дата звернення: 15.07.2025).

10. The Non-intrusive Detection of Incipient Cavitation in Centrifugal Pumps. URL: https://eprints.hud.ac.uk/id/eprint/14576/1/Faisal_Al_Thobiani_-_Final_Thesis.pdf (дата звернення: 15.07.2025).

11. Impact of design parameters on the performance of centrifugal pumps. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919306638> (дата звернення: 15.07.2025).

12. Pump Handbook. URL: <https://turbosan.com/pdf/pumphandbook.pdf> (дата звернення: 15.07.2025).

13. Fluid Flow, Pumps, Pipes and Channels. URL: <https://archive.org/details/fluidflowpumps/pi0000cher> (дата звернення: 15.07.2025).

14. Hydraulics and Pneumatics: A Brief Summary of their Operational Characteristics. URL: https://www.researchgate.net/publication/329041721_Hydraulics_and_Pneumatics_A_Brief_Summary_of_their_Operational_Characteristics (дата звернення: 15.07.2025).

15. How Centrifugal Pump Hydraulics affect rolling element bearing life. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0262176299806075> (дата звернення: 15.07.2025).

16. Centrifugal pump design and applications. URL: <https://www.araner.com/blog/centrifugal-pump-design-and-applications> (дата звернення: 15.07.2025).

17. Design of a single stage centrifugal pump. URL: https://www.researchgate.net/publication/359669267_DESIGN_OF_A_SINGLE_STAGE_CENTRIFUGAL_PUMP (дата звернення: 15.07.2025).

18. Pumping Up Energy Efficiency. URL: <https://www.iea.org/events/10th-annual-global-conference-on-energy-efficiency> (дата звернення: 15.07.2025).

19. Solving a cavitation problem. URL: <https://jacpump.wordpress.com/2021/04/17/solving-a-cavitation-problem/> (дата звернення: 15.07.2025).

20. On cavitation in fluid power. URL: https://www.researchgate.net/publication/228710074_On_cavitation_in_fluid_power (дата звернення: 15.07.2025).

21. Custodio, know and understanding centrifugal pump. URL: <https://sea-connect.com/assets/img/uploads/pdf/fc6ec98d88ba46dc32bf483b7589ff07.pdf> (дата звернення: 15.07.2025).

22. A vibration cavitation sensitivity parameter based on spectral and statistical methods. URL: https://www.researchgate.net/publication/265016219_A_vibration_cavitation_sensitivity_parameter_based_on_spectral_and_statistical_methods (дата звернення: 15.07.2025).

23. Gerotor pump cavitation monitoring and fault diagnosis using vibration analysis through the employment of auto-regressive-moving-average technique. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1569190X16302659> (дата звернення: 15.07.2025).

24. Feature Extraction and State Recognition of Cavitation Acoustic Emission Signals of Centrifugal Pump. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/163/1/012049> (дата звернення: 15.07.2025).

25. Su W-T., Zhao W., Binama M., Zhao Y., Huang J-Y., Chen X-R. Experimental Francis Turbine Cavitation Performances of a Hydro-Energy Plant. *Sustainability*. 2022. 14 (6), p. 3263.

26. Guo F., Li W., Jiang P., Chen F., Liu Y. Deep Learning Approach for Damage Classification Based on Acoustic Emission Data in Composite Materials. *Materials*. 2022. 15 (12), p. 4270.

27. Detection of cavitation in situ operation of kinetic pumps: Effect of cavitation on the characteristic discrete frequency component. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0003682X09000978> (дата звернення: 15.07.2025).

28. Zhang N., Li D., Gao B., Ni D., Li Z. Unsteady Pressure Pulsations in Pumps. A Review. *Energies*, 2023, 16, p. 150.

29. Numerical Investigation of Flow Field Behaviour and Pressure Fluctuations within an Axial Flow Pump under Transient Flow Pattern Based on CFD Analysis Method. URL: https://www.researchgate.net/publication/334789161_Numerical_Investigation_of_Flow_Field_Behaviour_and_Pressure_Fluctuations_within_an_Axial_Flow_Pump_under_Transient_Flow_Pattern_Based_on_CFD_Analysis_Method (дата звернення: 15.07.2025).

30. Toyran E., Rokhsar T.-F., Tzanakis I., Ghorbani M., Kosar A. Cavitating flow morphology determination in cavitation-on-a-chip devices based on local real-time pressure measurements. *Physics of Fluids*. 2025. Vol. 37.

31. Fundamentals of fluid mechanics. URL: https://www.researchgate.net/profile/John-Vlachopoulos/publication/315695099_Fundamentals_of_Fluid_Mechanics/links/58dc683b92851c611d2fa581/Fundamentals-of-Fluid-Mechanics.pdf (дата звернення: 15.07.2025).

32. Pipeline losses during condensate pumping and their impact on the operating point of the condensate pump. URL: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=190003 (дата звернення: 15.07.2025).

33. ДСТУ ГОСТ 6134:2009. Насоси динамічні. Методи випробування (ГОСТ 6134-2007 (ИСО 9906:1999), IDT; ISO 9906:1999, NEQ). [Чинний від 2009-07-01]. Вид. офіц. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2009. 102 с.

34. Розрахунок кавітаційного запасу насоса. URL: <https://medsv.github.io/dzen/0027/NPSH.html> (дата звернення: 15.07.2025).

35. Дерлюк С. О., Гуменюк П. О. Оцінка можливості виникнення кавітації в насосах. *Технологічні комплекси*. Луцьк, 2025. Том 17, № 2. С. 26-35.