

DOI: <https://doi.org/10.36910/4293-52779-2025-17-02-10>
УДК 621.6: 004.4: 004.9

Гуменюк П. О.
канд. техн. наук, доцент
ORCID: 0000-0002-6251-8548

Луцький національний
технічний університет / Україна

Гуменюк Л. О.
канд. техн. наук, доцент
ORCID: 0000-0002-7678-7060

Дерлюк С. О.
магістрант

ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ВИНИКНЕННЯ КАВІТАЦІЇ В НАСОСАХ

Анотація: у роботі описано основні параметри, які впливають на процес кавітації – швидкість потоку, тиск та в'язкість рідини. Описано алгоритм, що враховує основні параметри роботи насоса (тиск, температура, об'ємна витрата) для автоматизації розрахунку кавітаційного запасу та виконано його програмну реалізацію на Python. Проаналізовано залежність коефіцієнта кавітації від температури для трьох рідин: води, етанолу та ацетону. Проаналізовано залежність коефіцієнта кавітації від швидкості руху різних рідин. Зроблено висновки про вплив температури і швидкості руху рідини на коефіцієнт кавітації.

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

ВСТУП, ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Кавітація – це фізичне явище, яке характеризується утворенням, зростанням і подальшим колапсом бульбашок у рідині під дією різних зовнішніх впливів [1]. Вона супроводжується значними енергетичними ефектами, такими як підвищення температури і тиску, які можуть призводити до як позитивних, так і негативних наслідків [2].

Однією з основних проблем при проектуванні та застосуванні відцентрових насосів є можливість контролювати та обмежувати розвиток кавітації. Як правило, малоймовірно, 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. Багато насосів, що працюють у виробництві, працюють із кавітацією, але з рівнем, прийнятним для їх призначення.

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 [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 [4]. Важливо своєчасно виявляти та моніторити кавітацію для запобігання її негативному впливу, що дозволить покращити роботу та надійність відцентрових насосів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

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 [5]. Але з іншого боку існують практичні обмеження, які накладаються на конструкцію насоса умовами процесу або середовищем, у якому насос найчастіше працює.

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.

За механізмом утворення бульбашок у рідині кавітацію відцентрового насоса можна розділити на два основних типи – пароподібна кавітація та газова кавітація [6].

Пароподібна кавітація становить близько 70 % усієї кавітації [4] і є найпоширенішою формою кавітації, яка зустрічається на підприємствах.

Було проведено багато досліджень щодо виявлення кавітації у водяних насосах і водяних турбінах.

Більшість аналітичних методів зосереджено на впливі кавітації на продуктивність відцентрового насоса [7].

До інженерних методів можна віднести вібраційний метод [8], акустичну емісію [9], метод шуму [10], метод пульсації тиску [11] та інші.

Кожен з методів виявлення кавітації має свої переваги та обмеження. Важливо своєчасно виявляти та моніторити кавітацію для запобігання її негативному впливу, що дозволить покращити роботу та надійність відцентрових насосів.

ФОРМУЛЮВАННЯ ЦІЛЕЙ СТАТТІ

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

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕННЯ

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 [12].

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 1 [13]:

$$\sigma = \frac{P_{in} - P_{vapor}}{0,5 \cdot \rho \cdot V^2}, \quad (1)$$

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

P_{vapor} – тиску парів рідини (Па),

V – швидкість руху рідини (м/с),

ρ – густина води ($\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$).

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

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 набуті 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.

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.

3 точки зору імітації роботи насоса, 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 $P_{in} \cdot 0,025$ 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 1.

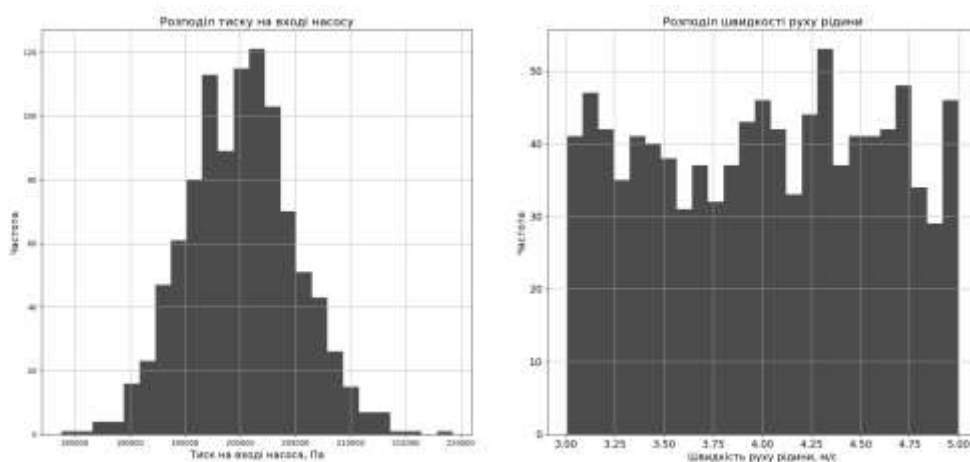


Рисунок 1 – Розподіл тиску та швидкості руху рідини

Залежність коефіцієнта кавітації від температури для різних рідин наведено на рисунку 2.

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

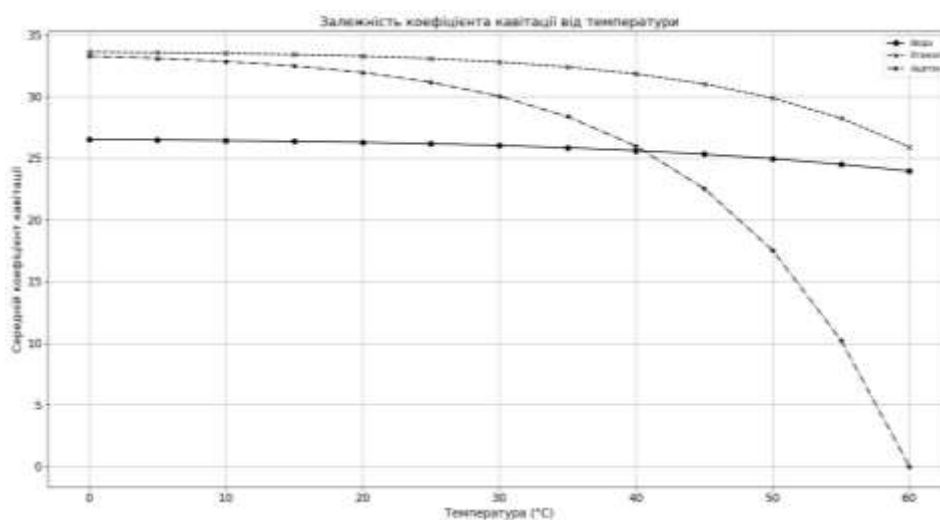


Рисунок 2 – Залежність коефіцієнта кавітації від температури для різних рідин

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 °С лише на 19% менший, ніж при 0 °С. 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 рисунках 3-5.

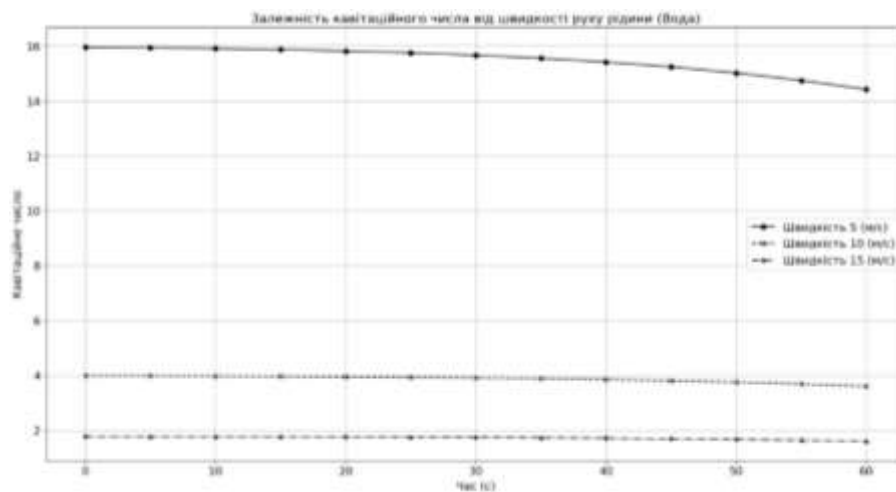


Рисунок 3 – Залежність коефіцієнта кавітації від швидкості руху рідини для води

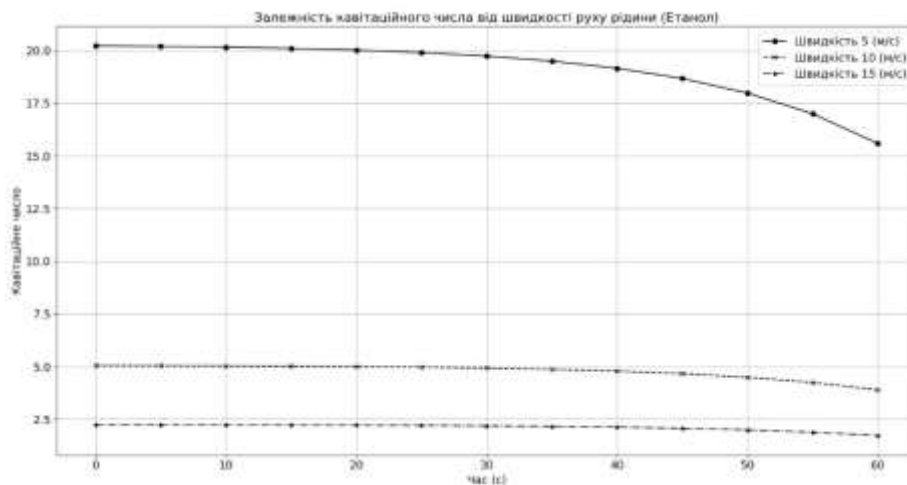


Рисунок 4 – Залежність коефіцієнта кавітації від швидкості руху рідини для етанолу

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.

Найбільш виражена залежність спостерігається при низьких температурах.

При 0 °С коефіцієнт кавітації води при швидкості 15 м/с майже в 9 разів менший, ніж при швидкості 5 м/с. Це робить воду більш схильною до кавітації при низьких температурах і високих швидкостях руху.

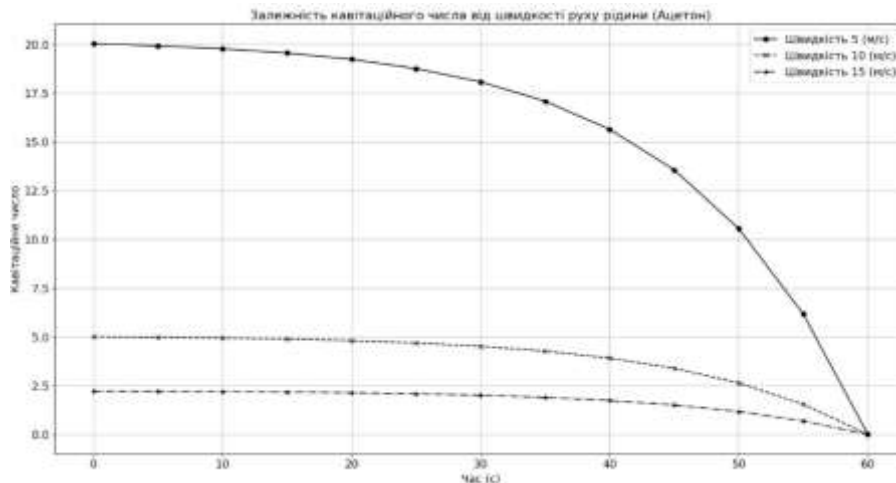


Рисунок 5 – Залежність коефіцієнта кавітації від швидкості руху рідини для ацетону

Найменш виражена залежність спостерігається при високих температурах. При 60 °С коефіцієнт кавітації води при швидкості 15 м/с майже в 2 рази менший, ніж при швидкості 5 м/с. Це робить воду менш схильною до кавітації при високих температурах.

Залежності коефіцієнта кавітації від швидкості руху рідини для етанолу, схожі з водою, але менш виражені.

Різниця в коефіцієнтах кавітації при різних швидкостях для етанолу менша, ніж для води при аналогічних температурах. Наприклад, при 0 °С різниця між коефіцієнтами при швидкостях 5 м/с і 15 м/с для води майже в 9 разів більша, ніж для етанолу.

Для ацетону вплив швидкості руху на коефіцієнт кавітації найбільш виражений при низьких температурах. Це можна побачити на прикладі 0 °С, де різниця в коефіцієнтах кавітації при швидкостях 5 м/с і 15 м/с майже в 2000 разів більша, ніж при 60 °С.

При високих температурах вплив швидкості руху стає значно менш вираженим.

ВИСНОВКИ

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 води, що пов'язано зі збільшенням динамічного тиску, що робить воду більш стійкою до кавітації. Найбільш виражена залежність спостерігається при низьких температурах, а вплив швидкості руху стає менш вираженим при високих температурах.

Порівнюючи етанол та ацетон з водою, залежність коефіцієнта кавітації від швидкості руху для етанолу подібна до води, але менш виражена. Вплив швидкості руху на коефіцієнт кавітації для ацетону найбільш виражений при низьких температурах і значно менш виражений при високих.

ЛІТЕРАТУРА

- [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://surl.li/ubypdp> (дата звернення: 15.07.2025).
- [3] Impact of design parameters on the performance of centrifugal pumps. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978919306638> (дата звернення: 15.07.2025).
- [4] Custodio, know and understanding centrifugal pump. URL: <https://sea-connect.com/assets/img/uploads/pdf/fc6ec98d88ba46dc32bf483b7589ff07.pdf> (дата звернення: 15.07.2025).
- [5] Pumping Up Energy Efficiency. URL: <https://www.iea.org/events/10th-annual-global-conference-on-energy-efficiency> (дата звернення: 15.07.2025).
- [6] On cavitation in fluid power. URL: <https://surl.li/uladdr> (дата звернення: 15.07.2025).
- [7] Pump Handbook. URL: <https://turbosan.com/pdf/pumphandbook.pdf> (дата звернення: 15.07.2025).
- [8] A vibration cavitation sensitivity parameter based on spectral and statistical methods. URL: <https://surl.lt/hnxrsb> (дата звернення: 15.07.2025).
- [9] 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.
- [10] Detection of cavitation in situ operation of kinetic pumps: Effect of cavitation on the characteristic discrete frequency component. URL: <https://surl.lu/hteqyj> (дата звернення: 15.07.2025).
- [11] Zhang N., Li D., Gao B., Ni D., Li Z. Unsteady Pressure Pulsations in Pumps. A Review. *Energies*, 2023, 16, p. 150.
- [12] 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.
- [13] Fundamentals of fluid mechanics. URL: <https://surl.lt/jpjsya> (дата звернення: 15.07.2025).

ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF CAVITATION IN PUMPS

Humeniuk, P. PhD, Associate Professor

Gumeniuk, L PhD, Associate Professor

Derlyuk, S. undergraduate

Lutsk National Technical University / Ukraine

Abstract. The paper describes the main parameters that affect the cavitation process: flow velocity, pressure, and fluid viscosity. An algorithm is described that takes into account the main parameters of pump operation (pressure, temperature, volumetric flow rate) for automating the calculation of cavitation margin, and its software implementation in Python is performed. The dependence of the cavitation coefficient on temperature for three liquids: water, ethanol, and acetone, is analyzed. The dependence of the cavitation coefficient on the velocity of various liquids is analyzed. Conclusions are made about the influence of temperature and fluid velocity on the cavitation coefficient.

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

Дата першого надходження статті до видання	Дата прийняття статті до друку статті після рецензування	Дата оприлюднення
30.10.2025 р.	21.11.2025 р.	23.12.2025 р.