

УДК 532.528

## Порівняння гідродинамічних параметрів у кавітаційних апаратах з різними конфігураціями звужувальних каналів

Вітенько Д.О.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, Україна

*Дослідження присвячене аналізу гідродинаміки статичних кавітаційних апаратів та об'ємів парогазової фракції, що формується в дифузори. Для оцінки було застосовано методи чисельного моделювання. Досліджували моделі з конічною, шнековою та складною перешкодою та базову, конструкція якої не передбачає перешкоди. Результати засвідчили, що конічна перешкода забезпечує рівномірний розподіл парогазової фази вздовж дифузора, що наближається до нормального, тоді як шнекова перешкода сприяє формуванню локальних ділянок, характерних для пульсацій та зривів потоку. Складна перешкода демонструє рівномірне збільшення об'єму парогазової фракції до максимального значення, після чого спостерігається поступове зниження. Порівняння розподілу тиску та швидкості вздовж дифузора показало, що конічна перешкода забезпечує стабільніший потік, з оптимальним розподілом параметрів, тоді як шнекова перешкода створює значні коливання швидкості та тиску, що негативно впливає на стабільність кавітаційного процесу. Складна перешкода забезпечує більш збалансовану динаміку процесу із меншою варіативністю параметрів у порівнянні з шнековою перешкодою. Отримані результати мають значення для вдосконалення конструкцій кавітаційних пристроїв, сприяючи підвищенню їхньої стабільності, ефективності та адаптації до конкретних технологічних вимог.*

*Ключові слова:* гідродинаміка; парогазова фракція; швидкість; тиск; чисельні методи

Кавітаційні явища активно досліджуються як ефективний інструмент для інтенсифікації гідромеханічних, тепломасообмінних та хімічних процесів у промисловості [1-4]. Зокрема, процеси кавітації використовуються для покращення теплопередачі, змішування рідин, а також в хімічних реакціях, де утворення мікробульбашок сприяє більш ефективному розподілу енергії та реагентів. Це дає можливість значно підвищити продуктивність обладнання, зменшити енергоспоживання та знизити витрати на реагенти. У таких процесах важливим є контроль за інтенсивністю кавітації, оскільки надмірне або неконтрольоване виникнення кавітаційних явищ може призвести до пошкодження обладнання або зниження ефективності процесу.

Моделювання кавітаційних апаратів є актуальним і перспективним напрямом, що дозволяє прогнозувати ефективність обладнання, оптимізувати дослідницькі процеси та значно скорочувати час і ресурси. Дослідження присвячено апаратам статичного типу які завдяки простоті, зручності експлуатації та високій керованості широко використовуються в різних галузях. Особливу увагу в дослідженнях приділяють умовам виникнення кавітації, її впливу на систему, а також конструктивним особливостям трубок Вентурі, які забезпечують значні перепади тиску. Визначальну роль у цьому процесі відіграють геометричні параметри внутрішнього каналу, такі як форма, площа перетину та довжина, а також технологічні характеристики потоку, які впливають на стабільність і ефективність роботи пристроїв. Оптимізація цих факторів не лише підвищує довговічність і продуктивність систем, а й розширює їх можливості для використання в інтенсифікації технологічних процесів.

Авторами [4] представлено сучасний стан досліджень щодо переваг тривимірного (3D) моделювання, порівняно до одновимірних (1D) і двовимірних (2D) підходів. У статті [5] досліджено вплив кута розширення дифузора та довжини звуженої ділянки, на кавітаційні параметри. Виявлено, що кут дифузора значною мірою впливає на виникнення та розвиток

кавітації, тоді як довжина ділянки має менш виражений вплив. У роботі [6] вивчали динаміку парогазової фракції. Авторами [7] встановлено, що геометрія трубки Вентурі впливає на об'єм та якісний склад парогазової фракції. У дослідженні [8] розглядають динаміку кавітаційної каверни залежно від кавітаційного числа та витрат рідини. У роботі [9] проаналізовано механізм відриву та колапсу кавітаційної порожнини, зокрема вплив кута розширення дифузора. Узагальнені результати демонструють значення оптимізації конструкції трубок Вентурі для покращення керованості кавітаційними процесами.

Моделювання виконували у середовищі Flow Simulation, інтегрованому у SolidWorks, з використанням рівнянь Нав'є-Стокса для опису законів збереження маси, імпульсу та енергії потоку. Вихідними даними були геометрія апарату, тип потоку, граничні умови (вхідний тиск 0,35–0,7 МПа, витрата 0,0017–0,005 м<sup>3</sup>/с) та фізичні властивості рідини. Результати включали розподіли тиску, швидкості та відносного об'єму парогазової фракції, що візуалізували для аналізу. Обчислення забезпечили раціональну точність завдяки налаштуванню роздільної здатності сітки та використанню адіабатичних стінок.

Чисельне моделювання кавітаційних явищ у досліджуваних моделях з перешкодами дозволило оцінити вплив геометричних параметрів внутрішнього каналу конфузора на кавітаційні характеристики та можливість регулювання інтенсивності кавітації, оскільки використання шнекових, гладких конічних та складних перешкод у конфузори буде змінювати вхідні параметри потоку і таким чином контролювати утворення і стабільність парогазової фази в дифузори, що є важливим фактором для промислових застосувань. Встановлення перешкод сприяє збільшенню швидкості потоку та зниженню тиску в межах ділянки, де утворюється парогазова фаза. Це впливає на енерговитрати. Перешкоди також дозволяють збільшити об'єм кавітуючої ділянки, де утворюються кавітаційні бульбашки, що відповідно впливає на її об'єм, сприяючи стабільнішому кавітаційному процесу.

За результатами розрахунку було встановлено, що за витрати рідини  $Q = 0,0017$  м<sup>3</sup>/с, усі чотири конструкції демонструють відсутність кавітації. У базовій конструкції ( $\sigma = 2,08$ ), трубі зі шнеком ( $\sigma = 1,96$ ), з конусом ( $\sigma = 1,85$ ) і зі складною перешкодою ( $\sigma = 1,98$ ) число кавітації перевищує критичне значення 1, що означає відсутність кавітаційних явищ. За зростання витрати до  $Q = 0,003$  м<sup>3</sup>/с спостерігається бульбашкова кавітація у всіх конструкціях. За таких умов у базовій - число кавітації ( $\sigma = 0,89$ ) більше ніж у конструкції зі шнеком ( $\sigma = 0,79$ ) та моделі з конусом ( $\sigma = 0,76$ ). Для моделі зі складною перешкодою характерно  $\sigma = 0,82$ . За  $Q = 0,005$  м<sup>3</sup>/с процес кавітації стає більш інтенсивним через збільшення швидкості потоку та зниження тиску. У базовій конструкції ( $\sigma = 0,71$ ) і моделі зі шнеком ( $\sigma = 0,63$ ) кавітація більше виражена. З іншого боку, для моделі з конусом  $\sigma = 0,58$ , а для конструкції зі складною перешкодою  $\sigma = 0,70$ . Отже, найменші значення числа кавітації спостерігаються в моделях з конусом зі шнеком, що свідчить про найбільшу інтенсивність кавітації у цих конструкціях. З іншого боку, базова конструкція і модель зі складною перешкодою мають більш високі значення числа кавітації, що засвідчує меншу інтенсивність кавітаційних явищ.

Аналіз гістограм, що відображають розподіл парогазової фази для різних конструкцій, показав відмінності щодо розподілу парогазової фракції в дифузори. У базовій конструкції спостерігається гострий пік за певних вхідних умов, що вказує на локалізовану ділянку де утворюється парогазова фракція. У конструкції зі шнеком спостерігається довша ділянка дифузора де спостерігається парогазова фракція. Пік розподілу парогазової фази зміщується до виходу, а розподіл стає більш рівномірним, що свідчить про більш стійку кавітацію. Завдяки шнековій перешкоді, що викликає турбулентність і закручування потоку, кавітаційна ділянка охоплює ще більшу частину дифузору, що сприяє стабілізації кавітації. Для конструкції з конусом розподіл парогазової фази виявляється більш широким, розподілом та вищим піком на гістограмі. Цей результат вказує на більш стабільне формування парогазової фракції в порівнянні з моделями без перешкоди і зі шнеком, що може бути важливим для

процесів, де потрібна стабільність кавітації. Модель зі складною перешкодою можна оцінити як найменш ефективною у порівнянні з попередніми конструкціями.

#### Список літератури

1. Luhovskyi, O., Zheliaskova, T., Zilinskyi, A., & Zheliaskov, V. Analysis of the hydrodynamics of cavitation devices with different obstacle configurations / O. Luhovskyi, T. Zheliaskova, A. Zilinskyi, V. Zheliaskov. — Mechanics and Advanced Technologies, 2024. — Vol. 8, No. 1. — P. 108-114
2. Bernyk, I., Nazarenko, I., Zapryvoda, A., Bolharova, N., Ruchynskyi, M., & Nesterenko, T. Identifying the parameters and operation modes of the cavitation apparatus taking into account the influence of the processing material / I. Bernyk, I. Nazarenko, A. Zapryvoda, N. Bolharova, M. Ruchynskyi, T. Nesterenko. — Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2024. — Vol. 131, No. 7.
3. К. О. Самоічук, О.О. Ковалев, А. О. Івченко. Аналіз методів оцінювання якості гомогенізації молока: монографія. — Мелітополь: Таврійський державний агротехнологічний університет, 2012. — 128 с. — Available: <http://elar.tsatu.edu.ua/handle/123456789/873>
4. Vijayan A. Characterization of cavitation zone in cavitating venturi flows: Challenges and road ahead / A. Vijayan // Physics of Fluids. — 2023. — Т. 35, № 11.
5. Simpson A., Ranade V.V. Modeling hydrodynamic cavitation in venturi: Influence of venturi configuration on inception and extent of cavitation / A. Simpson, V. V. Ranade // AIChE Journal. — 2019. — Т. 65, № 1. — С. 421–433.
6. Sato K., Hachino K., Saito Y. Inception and dynamics of traveling-bubble-type cavitation in a venturi / K. Sato, K. Hachino, Y. Saito // Fluids Engineering Division Summer Meeting. — 2003. — Т. 36967.
7. Li M., et al. Study of Venturi tube geometry on the hydrodynamic cavitation for the generation of microbubbles / M. Li, et al. // Minerals Engineering. — 2019. — Т. 132. — С. 268–274.
8. Brunhart M., et al. Investigation of cavitation and vapor shedding mechanisms in a Venturi nozzle / M. Brunhart, et al. // Physics of Fluids. — 2020. — Т. 32, № 8.
9. Fang L., et al. Numerical investigation of the cavity shedding mechanism in a Venturi reactor / L. Fang, et al. // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2020. — Т. 156. — С. 119835.

## Comparison of Hydrodynamic Parameters in Cavitation Devices with Various Constrictor Configurations

Vitenko Dmytro

Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, Ukraine

*The analysis is dedicated to investigating the hydrodynamics of three models of cavitation devices and comparing the volumes of the vapor-gas fraction formed in the diffuser. Numerical modeling methods were used to evaluate the hydrodynamic parameters. Models with conical, helical, and complex obstacles were investigated. The results showed that a uniform distribution of the vapor-gas phase along the diffuser is ensured by the conical obstacle, approaching a normal distribution, while the helical obstacle forms localized areas characteristic of pulsations and flow separation. A uniform increase in the vapor-gas fraction volume up to a maximum value is observed with the complex obstacle, after which a gradual decrease is noted.*

*The comparison of pressure and velocity distributions along the diffuser showed that the conical obstacle provides a more stable flow with an optimal parameter distribution. In contrast, the helical obstacle generates significant fluctuations in velocity and pressure, negatively affecting the stability of the cavitation process. A more balanced process dynamic, with less parameter variability, is ensured by the complex obstacle compared to the helical obstacle.*

*The results are crucial for improving cavitation device designs and enhancing stability, efficiency, and adaptability to specific technological requirements.*

*Keywords:* Hydrodynamics; vapor-gas fraction; velocity; pressure; numerical methods.