



DOI: 10.32782/2220-8674-2024-24-2-9

УДК 532.528

Д. О. Вітенько, асп.,

ORCID: 0009-0004-0050-2104

Т. М. Вітенько, д.т.н.

ORCID: 0000-0003-4084-0322

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

e-mail: dmitrovitenko25@gmail.com

АНАЛІЗ ТА ПОРІВНЯННЯ ГІДРОДИНАМІКИ ПОТОКУ У КАВІТАЦІЙНИХ АПАРАТАХ

Анотація. У статті запропоновано конструкцію кавітаційного апарата по типу труби Вентурі, з можливістю регулювання інтенсивності кавітаційних ефектів та впливу на технологічні середовища. Досліджено гідродинамічні та кавітаційні параметри двох конструкцій на основі результатів чисельних розрахунків за допомогою програмного забезпечення SolidWorks з модулем Flow Simulation. Результати моделювання засвідчили, що конструкція з можливістю регулювання інтенсивністю кавітаційних ефектів у порівнянні з апаратом запропонованим Лонгом є не менш ефективною. Отримані результати засвідчили незначне зростання швидкості і падіння тиску у соплі досліджуваної конструкції порівняно до базової за однакових початкових умов та зменшення значень числа кавітації, що забезпечує формування парогазової фази більшого об'єму.

Ключові слова. Гідродинамічна кавітація, труба Вентурі, SolidWorks, Flow Simulation, інтенсивність кавітації, чисельні розрахунки.

Постановка проблеми. Явище гідродинамічної кавітації на сьогодні часто асоціюється з негативним впливом, що спостерігають у насосах, трубопроводах, вентиляційних системах та турбінах. Локальне падіння тиску, викликане зміною геометрії потоку або іншими технологічними особливостями, призводить до утворення парогазової фази, яка і є причиною руйнувань поверхонь. Встановлено, що життєвий цикл парогазових кавітаційних порожнин триває кілька тисячних часток секунди, а колапс відбувається майже миттєво через імпульсію, спричинену раптовим зростанням тиску [1]. Це відрізняє кавітаційне кипіння від високотемпературного або хімічного, де бульбашки мають більші розміри та довший життєвий цикл. Під час кавітаційного кипіння пароутворення відбувається всередині потоку рідини або біля поверхні, особливо в місцях наявності тріщин чи шорсткостей, що може призводити до руйнування. Тому при проектуванні обладнання враховують можливі кавітаційні ефекти. Водночас, кавітаційні явища також знайшли своє застосування в промисловості як інструмент для інтенсифікації гідромеханічних, тепломасообмінних та хімічних процесів [2]. Однією з концепцій, що



обґрунтовує позитивний вплив кавітаційних ефектів на процеси та технологічні системи, є дискретний розподіл енергії та маси, детально описаний у роботах [3]. Концепція, що розглядає питому потужність як міру динамічного впливу на систему, заснована на швидкості трансформації енергії. Вплив на систему збільшується зі зростанням швидкості цієї трансформації. Існують два способи підвищення питомої потужності до рівня, при якому вона перевищує критичне значення. Це або збільшення швидкості розподілу енергії, зберігаючи тривалість трансформації незмінною, або зменшення тривалості трансформації, без зміни швидкості розподілу енергії. В обох випадках досягається необхідний рівень потужності, хоча витрати енергії можуть відрізнятися.

Аналіз останніх досліджень. Механізм перетворення енергії під час кавітації включає кілька ключових етапів: ініціювання, формування, ріст парової фази та її колапс. Відомо, що різке зниження тиску в рідині сприяє виділенню парогазової фази, а швидке підвищення тиску створює значну різницю між тиском у рідкій і паровій фазах, що визначає рівень акумульованої потенційної енергії в системі. В таких процесах накопичена потенційна енергія перетворюється в кінетичну енергію радіального руху рідини в межах стиснутої паргазової бульбашки, створюючи короткотерміновий імпульс тиску, який розповсюджується у формі сферичної ударної хвилі. При цьому формуються високі амплітуди імпульсів, які можуть досягати приблизно 1000 МПа. Висока швидкість і прискорення рідини забезпечують ефективний динамічний вплив на систему.

У випадку коли бульбашки сплескуються поблизу твердої поверхні або великих твердих частинок, кінетична енергія радіального руху рідини перетворюється в механічну енергію рідкої кумулятивної мікрострумені, яка вилітає з бульбашки з великою швидкістю і спрямовується до твердої поверхні (частинки), створюючи потужний локалізований ударний вплив. Цей кумулятивний механізм добре досліджений експериментально і теоретично. Він ілюструє принципи дискретно-імпульсного введення енергії, що включає зосередження енергії у визначених часових і просторових ділянках, та концентрацію імпульсів енергії. Цей підхід обґрунтовує ефективність використання кавітаційних явищ для створення потужних локалізованих імпульсів енергії, що має значні перспективи для різних інженерних і технологічних застосувань [3].

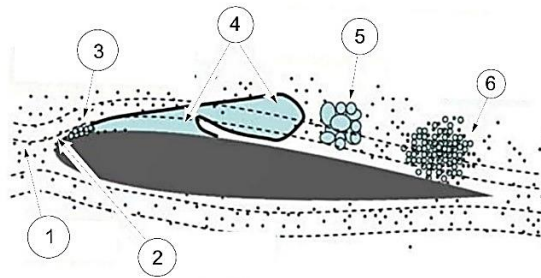
Ступінь впливу на систему та його інтенсивність залежать від виду кавітації. Наприклад, потокова або струминна кавітація виникає внаслідок зменшення статичного тиску у рідині нижче певного рівня, викликаного місцевим збільшенням швидкості потоку або змінами зовнішніх умов. Це явище часто спостерігається у вузьких ділянках



каналів та на місцях локальних опорів трубопроводів. Парова кавітація виникає, коли тиск рідини наближається до критичного, що дорівнює тиску випаровування рідини за встановленої температури. Газова кавітація виникає внаслідок дифузії газу, що вже наявний у рідині, всередину бульбашок, які формуються внаслідок перенасичення рідини газом та зменшення тиску. В цьому випадку спостерігають повільніше зростання кавітаційних бульбашок порівняно з паровою кавітацією і меншу інтенсивність впливу [4]. Вібраційна кавітація виникає при взаємодії рідини зі структурою або поверхнею під впливом вібраційних коливань. Це явище часто спостерігається під час вібрацій рідини або при швидких коливаннях твердого тіла у рідині. Розрив рідини та утворення кавітаційних бульбашок відбуваються у першій половині періоду розрідження, а їх імплізія – на етапі стискання [5].

Розглядаючи різні види кавітації та їхній вплив на технологічні середовища й обладнання, доцільно розуміти особливості ефектів, що виникають та можливості використання того чи іншого режиму обробки. У наукових публікаціях часто вживають терміни "початкова кавітація" й "розвинена кавітація", які класифікують етапи розвитку цього фізичного процесу. "Початкова кавітація" описує момент утворення перших кавітаційних зародків у рідині [6]. У процесі розвитку явища (так звана "розвинена кавітація") відбувається зростання кількості бульбашок і їх злиття в каверну. Крім того, терміни "суперкавітація" і "псевдокавітація" визначають специфічні форми кавітації залежно від умов та контексту. "Суперкавітація" вказує на винятково екстремальні умови, де кавітаційні порожнини можуть існувати при значеннях тиску і температури, що зазвичай призводять до інших фазових станів речовини. "Псевдокавітація" розглядається як специфічна форма, де умови створюються штучно або в результаті особливостей середовища, що призводять до візуально подібних ефектів, які не мають впливу на технологічне середовище (наприклад, барботування газом).

Важливими класифікаційними критеріями є розміри порожнин, їх кількість, форма та розміри кавітаційної ділянки, яка спостерігається у вигляді блукаючих бульбашок, плівки, хмари чи каверн, оскільки від цих характеристик залежить ступінь впливу на технологічний потік. Схематичне зображення різних типів кавітації на лопатці допомагає візуалізувати відмінності між кавітаційними режимами (рис. 1) [7].



.....
1 - мікопульсації потоку; 2-кавітаційні зародки; 3-зростаючі парогазові бульбашки; 4-плівкова кавітація; 5- парогазові бульбашки на етапі трансформації; 6- хмара бульбашок

Рис. 1. Формування кавітації на лопатці [7]

Умови виникнення кавітаційного режиму визначаються критичними гідродинамічними параметрами. Критичний тиск, при якому виникає кавітація, це тиск насиченої пари рідини при заданій температурі як було згадано вище. Точне значення критичного тиску залежить також від властивостей рідини та геометрії системи. Його можна визначити експериментально або розрахувати для конкретної ситуації. Критична швидкість потоку, при якій виникає гідродинамічна кавітація, це та швидкість, при якій тиск рідини в деякій частині системи падає до рівня насиченої пари цієї рідини при даних температурі та тиску. Вона також залежить від різних факторів, таких як тиск, газоміст та інші властивості рідини. Геометрія системи також суттєво впливає на гідродинаміку потоку і кавітаційні характеристики.

Розрахунок числа кавітації є ключовим етапом у вивченні явища гідродинамічної кавітації. Використання цього параметра дозволяє оцінити потенціал різних конструкцій обладнання до виникнення кавітації. Порівняння значень кавітаційного числа з критичним значенням (зазвичай це 1) дозволяє прогнозувати можливість виникнення кавітації та вживати заходи для її запобігання або використання та регулювання. Кавітаційне число (позначене як σ) також служить індикатором опору потоку до кавітації і обчислюється за формулою [8]:

$$\sigma = \frac{P_o - P_v}{0.5 \cdot \rho \cdot v^2} \quad (1)$$

де P_o – тиск на виході з апарата, Па;

P_v - тиск пари, Па;

ρ - густина рідини, м³/с;

v - швидкість потоку рідини, м/с/

Розглядаючи різні форми кавітації, важливо враховувати параметри, які впливають на формування необхідного режиму та ефективність і результативність процесів. Регулювання кавітаційними



процесами і відповідно ступенем впливу на систему можливе за рахунок зміни швидкості потоку, тиску, температури і геометрії робочої ділянки. Завдяки оптимізації параметрів кавітації, можна знижувати енергоспоживання і підвищувати економічну ефективність технологічних процесів. З іншого боку якість кінцевого продукту також залежить від вірно налаштованого режиму обробки тобто рівня кавітаційного впливу на систему. Для галузей, таких як фармацевтика та харчова промисловість, де висока точність і чистота є критичними, регулювання інтенсивності кавітації дозволяє досягти необхідних стандартів якості обробки. Не менш важливою є відповідність технічним специфікаціям у різних сферах застосування. Регулювання інтенсивності кавітації дозволяє гнучко адаптувати результати процесів обробки до специфічних вимог. Наприклад, таких як розмір частинок в процесах емульгування і диспергування. Отже визначення параметрів кавітації та їх зміна в процесі обробки є важливим аспектом в практичному використанні цього явища, яке може бути як корисним, так і небезпечним. Експериментальні та чисельні дослідження кавітаційних апаратів допомагають розуміти поведінку потоку та розробляти надійні моделі для прогнозування і удосконалення дизайну конструкцій з метою регулювання кавітаційними факторами впливу на технологічне середовище.

Формулювання мети статті (постановка завдання). Метою дослідження було порівняння гідродинамічних та кавітаційних характеристик двох конструкцій кавітаційних апаратів на базі труби Вентурі. Базовим був вибраний апарат запропонований Лонгом, як один з ефективних, з точки зору геометрії конфузор-сопло-дифузор. Його порівнювали з досліджуваною конструкцією, що забезпечує гнучке регулювання інтенсивності кавітаційного впливу на технологічне середовище.

Основними завданнями досліджень було:

1. Створити геометричні моделі для базової моделі, запропонованої Лонгом, та удосконаленої конструкції, використовуючи програмне забезпечення SolidWorks.
2. На основі отриманих результатів чисельних розрахунків, проаналізувати гідродинамічні та кавітаційні параметри потоку для обох конструкцій (розподіл швидкостей і тисків в межах критичних ділянок, числа кавітації та об'єм парогазової фази).
3. Оцінити вплив ключових параметрів конструкції стосовно умов початку кавітаційного режиму, окремих аспектів регулювання кавітаційних факторів впливу.

Основна частина. Для чисельного моделювання було використано програмне забезпечення SolidWorks з модулем Flow Simulation, який дозволяє виконувати гідродинамічний аналіз на основі вирішення

рівнянь Нав'є-Стокса. Ці рівняння описують процеси збереження маси, імпульсу та енергії в рідинах та газах. У процесі налаштування моделі були визначені три основні параметри: точність обчислень, розмірність сітки та критерії збіжності. Для досягнення необхідної точності розподілу швидкості та тиску в критичних зонах конструкції (конфузор та сопло труби Вентурі) було обрано рівень сітки 5. Це дозволило отримати інформацію щодо зміни швидкості потоку і тиску, що виникають робочих ділянках, достатньої точності. У дослідженні були проаналізовані дві моделі: базова (модель 1), (рис. 2) [9], та удосконалена конструкція (модель 2), (рис. 3) з камерою попередньої обробки, оснащеної обтічником та конусною перешкодою. Дослідження проводили у декілька етапів:

1. Створення геометричних моделей. Були створені геометричні моделі обох конструкцій в середовищі SolidWorks.

2. Налаштування параметрів у Flow Simulation. Параметри моделювання були налаштовані в модулі Flow Simulation зокрема, визначено точність обчислень, розмірність сітки та критерії збіжності.

3. Визначення початкових граничних умов. Для обох моделей були задані початкові умови, які включали вхідну об'ємну витрату потоку, що змінювалась у діапазоні від 0,0017 до 0,003 м³/с, температуру, яка залишалась сталою 293 К і тиск на вході в межах $P_{вх}=0,35 - 0,6$ МПа.

4. Розрахунки та аналіз результатів. Після налаштування моделі було виконано чисельні розрахунки для кожної з конструкцій залежно від поставленого завдання. Аналізували гідродинамічні та кавітаційні характеристики, такі як швидкість потоку, тиск, об'єм парогазової фази і число кавітації.

5. Візуальні спостереження.

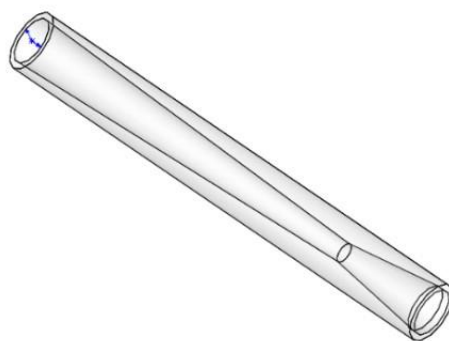
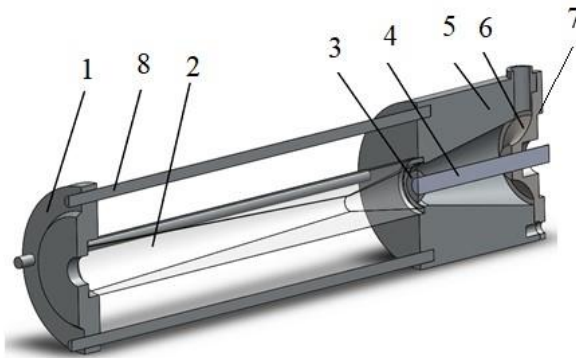


Рис. 2. Труба Вентурі запропонована Лонгом [9]

На (рис. 2) зображено трубу запроповану Лонгом. Вона є удосконаленою версією труби Вентурі, розробленою для генерації кавітації. Вона забезпечує достатнє зниження тиску в конфузорній

частині за умови забезпечення необхідної швидкості і тиску на вході, що викликає кавітацію в соплі і дифузорі, але має обмеження в регулюванні інтенсивності цього процесу. Досліджувана конструкція оснащена конусною перешкодою на вході в дифузор, що надає можливість зміни тиску і швидкості на вході в сопло та інтенсивності кавітації відповідно. Водночас, слід зазначити, що у досліджуваній конструкції потік подається через патрубок, розташований перпендикулярно до основного потоку, що зменшує швидкість та впливає на умови виникнення кавітації. Для забезпечення необхідної швидкості та тиску на вході в сопло запропоновано встановити конусну камеру попередньої обробки з обтічником, завдяки чому зменшується гідродинамічний опір та зростає швидкість на вході в сопло.



1-передня кришка; 2-труба Вентурі запропонована Лонгом;
3-конусна перешкода; 4-механізм переміщення перешкоди; 5-конусна
камера попередньої обробки; 6-обтічник; 7- задня кришка

Рис. 3. Досліджувана конструкція:

Кут конусності камери попередньої обробки був вибраний на підставі існуючих досліджень, які показали, що діапазон від 30° до 45° є найбільш раціональним [10, 11, 19]. Такий кут також дозволяє уникнути утворення ділянок з низькою швидкістю в дифузорі та забезпечує плавний перехід потоку від камери попередньої обробки до конфузора, що також підвищує стабільність роботи апарата. Раціональний радіус кривизни полусфер обтічника забезпечує зниження гідродинамічного опору та підвищення загальної ефективності роботи конструкції, зменшення енергетичних втрат та підвищення стабільності процесу. Радіус кривизни був обраний на основі аналізу швидкісних характеристик потоку (чисельне моделювання). Конусна перешкода з механізмом переміщення забезпечує зміну геометрії потоку та регулювання режиму обробки відповідно.



Обговорення результатів. У (табл. 1) наведено результати чисельних розрахунків для апарата на базі труби Вентурі розробленої Лонгом та удосконаленої конструкції (рис.2). Початкові параметри становили: тиск на вході 0,35 МПа і витрата 0,00117м³/с. Аналізуючи дві конструкції, можна помітити несуттєві відмінності в гідродинамічних та кавітаційних параметрах. Зокрема, у базовій конструкції швидкість на вході в конфузор становила 3,73 м/с, а в соплі - 26,16 м/с. Для конструкції з конусною камерою та перешкодою швидкість на вході становила $v_1=3,86$ м/с, а в соплі $v_2= 28,31$ м/с.

Таблиця 1

Результати чисельних розрахунків

Вид моделі	Швидкість на вході в конфузор, $v_1, \text{м/с}$	Швидкість в соплі $v_2, \text{м/с}$	$P_{\min}, \text{Па}$	Число кавітації σ
Труба Лонга (рис.1)	3,73	26,16	13704,25	0,95
Конструкція з конусною камерою і перешкодою на вході в конфузор (рис.2)	3,86	28,31	12528,29	0,86

Таким чином, удосконалена конструкція забезпечує аналогічні вхідні параметри до базової конструкції. Мінімальний тиск у найвужчій частині труби Лонга $P_{\min}=13704,25$ Па, тоді як у конструкції з конусною камерою $P_{\min}=12528,29$ Па. Число кавітації для труби Лонга $\sigma_1=0,95$, що свідчить про перед кавітаційний режим. Для досліджуваної конструкції $\sigma_2=0,86$, що вказує на початковий кавітаційний режим. Це може бути пов'язано з формуванням швидкісних потоків біля стінок (рис. 4, б) та областей з нижчим тиском в межах ділянок початкового утворення парогазової фази, незважаючи на те, що середні гідродинамічні параметри відрізняються незначно. Оскільки метою удосконалення конструкції було регулювання інтенсивності кавітації то на наступному етапі проводили дослідження щодо впливу зміни положення конусної перешкоди в конфузорі положення якої, впливатиме на зазор між стінками апарата і перешкодою і відповідно на гідродинамічні параметри, кавітаційні характеристики та інтенсивність кавітації. Дослідження проводили за вхідних параметрів: $Q=0,00117\text{м}^3/\text{с}$; $P_{\text{вх}}=0,35$ МПа, що за результатами попередніх

розрахунків відповідає ділянці – турбулентно-кавітаційний режим (докавітаційний режим).

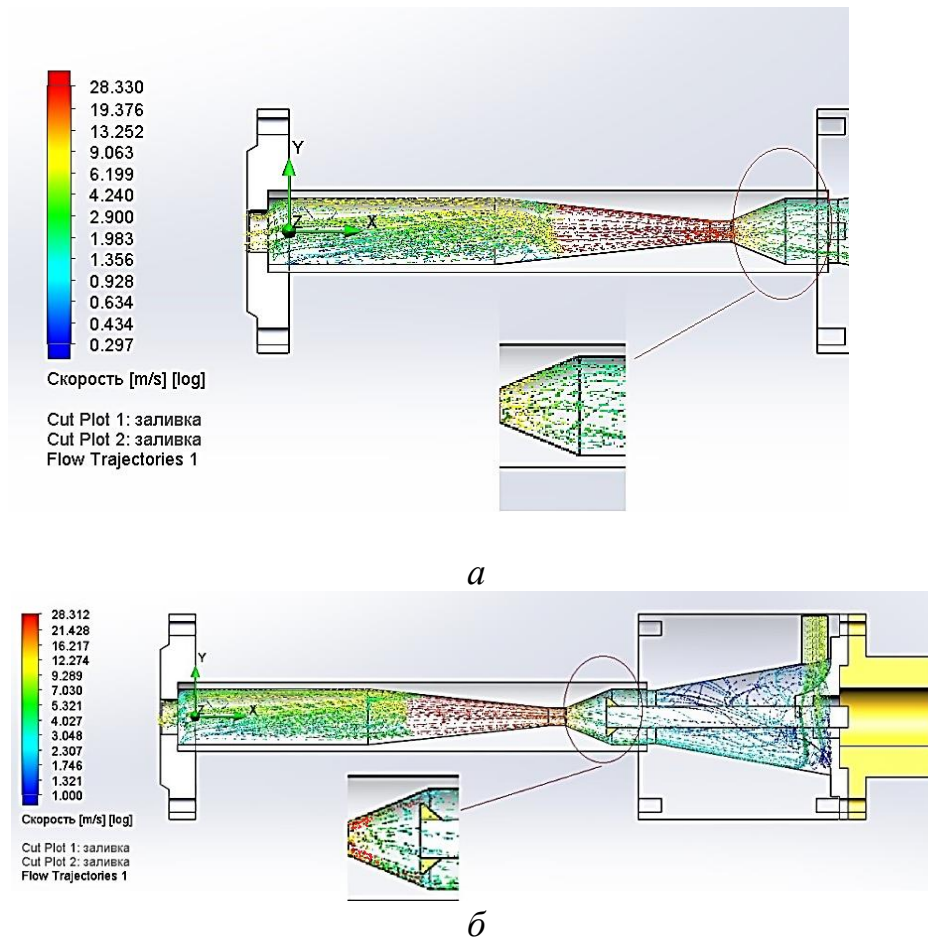


Рис. 4. Особливості розподілу швидкості потоку у досліджуваних конструкціях: а-труба Лонга; б-досліджувана конструкція

Результати досліджень зображено на (рис. 5), з яких спостерігається, що крайнє ліве положення перешкоди (рис. 5, с), демонструє більше зниження тиску, тобто кращі умови для формування парогазової фази. Результати візуальних досліджень зображено на фото нижче, (рис. 5).

Варіант з найбільшим зазором (рис.5, а) демонструє виділення газової фази у вигляді з'єднаних порожнин, які розділяються на малі вздовж труби. Причому включення спостерігаються по центру потоку, на відміну від картини (рис.5, с), де спостерігаються дрібні газові включення рівномірно сформовані по всьому об'єму.

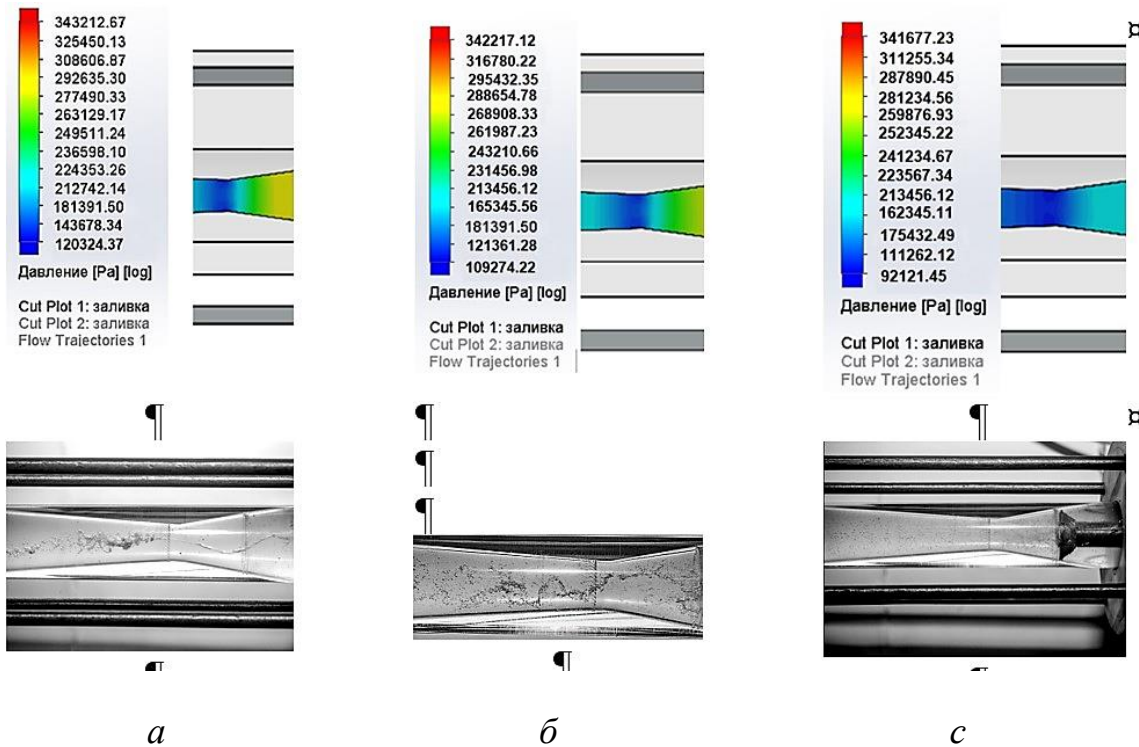


Рис. 5. Досліджувані моделі: а – зазор 3 мм; в- зазор 2мм; с-зазор 1 мм.

Звертаємо увагу на те, що в таких умовах ми говоримо про виділення газової фази, оскільки парової кавітації для таких умов не спостерігається. Для аналізу кавітаційної картини також було розраховано числа кавітації (табл.2), що визначають кавітаційний потенціал. Найменше число кавітації спостерігається для зазору в 1 мм.

Таблиця 2

Результати чисельних розрахунків

Зазор, мм	Швидкість в соплі v_2 , м/с	σ
3	16,1	2,27
2	17,6	1,9
1	18,72	1,68

Водночас їх значення (>1) підтверджують відсутність кавітації та початок так званої дегазації, що відбувається при пониженні тиску (перед кавітаційний режим). Результати чисельних розрахунків щодо формування парогазової фази показали її відсутність за таких умов. Наступні результати засвідчили, що за вхідного тиску 0,35 МПа, мінімально необхідна витрата для формування кавітаційного режиму є $0,0025\text{ м}^3/\text{с}$, тому подальші дослідження проводили за вхідної витрати $Q=0,003\text{ м}^3/\text{с}$. Результати чисельних розрахунків, що стосуються розподілу швидкості (рис. 6, а), тиску (рис.6, б) та об'єму

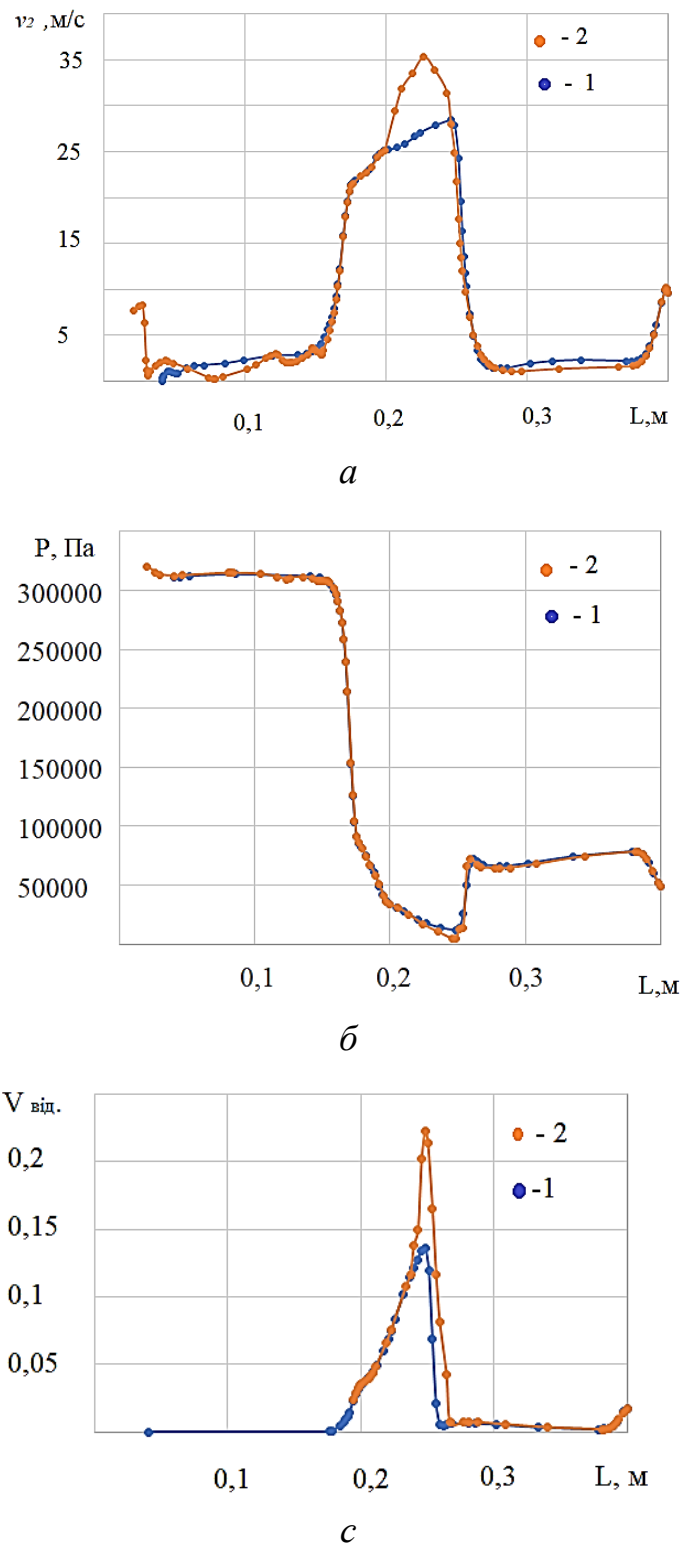


Рис. 6. Розподіл швидкості (а), тиску (б) та парогазової фази (с) вздовж апарата: 1 – Труба Вентурії запропонована Лонгом; 2 – досліджувана конструкція (зазор 1мм); $P_{\text{вх}}=0,35\text{МПа}$, $Q=0,003\text{м}^3/\text{с}$.

парогазової фази (рис. 6, с) за однакових вхідних умов для обох моделей, допомагають доповнити аналіз окремих аспектів гідродинаміки потоку в досліджуваній конструкції.



З (рис. 6) спостерігається зниження тиску у горловині конфузора до 5001,05 Па, що на 9,5% менше, ніж у базовій конструкції розробленої Лонгом за однакових вхідних параметрів потоку. Зменшення тиску у горловині дозволяє досягти більш інтенсивного кавітаційного режиму, що особливо важливо для технологічних процесів, де потрібна висока ефективність кавітації. Також спостерігається більший відносний об'єм парогазової фази. У (табл. 3) наведені порівняльні дані для обох конструкцій за різних значень вхідного тиску (400000Па, 500000Па, 600000Па). Відповідно до результатів спостерігається вища швидкість потоку в соплі та менші значення кавітаційного числа σ .

Таблиця 3

Результати чисельних розрахунків

Модель	$P_{вх}$, Па	P_2 , Па	v_2 , м/с	V_{n-2} , мм ³	σ
1	400000	10572,3	28,66	17113,5	0,84
2		10232,1	29,31	18215,4	0,81
1	500000	8324,3	31,19	31324,7	0,81
2		7987,5	33,23	33111,2	0,72
1	600000	6228,17	36,75	54158,3	0,74
2		5001,05	38,23	55215,7	0,68

Причому збільшення вхідного тиску $P_{вх}$ призводить до підвищення швидкості v_2 у соплі для обох моделей, що логічно обумовлено збільшенням різниці тисків між входом і виходом. Спостерігається зростання об'ємів парогазової фази V_{n-2} із підвищенням тиску на вході, що є закономірним, оскільки паралельно спостерігається зменшення тиску P_2 в зоні сопла. Слід зазначити. Що для детального вивчення гідродинаміки та кавітаційних характеристик потоку у апараті з можливістю регулювання режиму, необхідно провести дослідження та розрахунки у ширшому діапазоні витрат та тисків, що буде предметом подальших досліджень. Також доцільно вивчити характеристики парогазової фази які є важливими для визначення ступеня впливу на технологічні системи.

Висновки. На основі результатів чисельних розрахунків з використанням програмного забезпечення SolidWorks із модулем Flow Simulation було проведено дослідження гідродинамічних та кавітаційних характеристик для конструкції кавітаційного апарату на базі труби Вентурів, розробленої Лонгом, та її вдосконаленої версії, яка забезпечує можливість гнучкого регулювання інтенсивності кавітації. Результати, що стосуються розподілу швидкостей і тисків уздовж труби, дали змогу визначити ключові вхідні параметри для ініціації кавітації у вдосконаленій конструкції, зокрема мінімально необхідний вхідний тиск і швидкість потоку. Порівняння отриманих даних з



експериментальними результатами підтвердило їх достовірність. Крім того, результати дозволили встановити вплив положення перешкоди на гідродинамічні та кавітаційні параметри потоку, що має практичну цінність для промислових кавітаційних процесів. Виявлено, що у запропонованій конструкції спостерігається незначне зниження тиску в соплі та числа кавітації порівняно з базовою конструкцією.

Список використаних джерел

1. Brennen C.E. Frontmatter. In: Cavitation and Bubble Dynamics. Cambridge University Press, 2013.
2. Вітенько Т.М. Гідродинамічна кавітація у масообмінних, хімічних і біологічних процесах / Т.М. Вітенько. Тернопіль: ТДТУ ім. І. Пулюя, 2009. 220 с.
3. Долинський А.А., Іваницький Г.К. Тепломасообмін та гідродинаміка у парорідинних дисперсних середовищах. Теплофізичні основи дискретно-імпульсного введення енергії. Київ: Науково-виробниче підприємство «Видавництво Наукова думка НАН України», 2008. 382 с.
4. Arndt R.E.A. Cavitation in Fluid Machinery and Hydraulic Structures // Annual Review of Fluid Mechanics. 2002. Vol. 34, No. 1. P. 143–175.
5. Masanobu Watanabe, Koji Nishino, Yasumi Kitajima, Kazuyoshi Yonekura, Tsuyoshi Hagiwara. Flow-Induced Vibration of a Control Valve in a Cavitating Flow // ASME 2009 Pressure Vessels and Piping Conference, July 26–30, 2009, Prague, Czech Republic. Paper No: PVP2009-77373, pp. 239–246. <https://doi.org/10.1115/PVP2009-77373>.
6. Franc J.-P., Michel J.-M. Fundamentals of Cavitation. Springer Science & Business Media, 2006. 306 с.
7. Kawanami Y., Kato H., Yamaguchi H., Tanimura M., Tagaya Y. Mechanism and Control of Cloud Cavitation // Journal of Fluids Engineering. 1997. Vol. 119, No. 4. P. 788–794. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/cavitation-number>.
8. Long X.P., Wang J., Zuo D., Zhang J.Q., Ji B. Experimental investigation of the instability of cavitation in venturi tube under different cavitation stage // Journal of Mechanical Engineering. 2018. Vol. 54. P. 209–215.
9. Franc J.-P., Michel J.-M. Fundamentals of Cavitation. Springer Science & Business Media, 2006.
10. Liu Y., Li B. Numerical Investigation of the Cavitation Characteristics in Venturi Tubes: The Role of Converging and Diverging Sections // Applied Sciences. 2023. Vol. 13, No. 13. P. 7476.
11. Zhou Z., Li L., Xuan X., Chen S., Yoon J.Y., Sun X. Numerical investigation of partial cavitation in a Venturi tube by Eulerian-Lagrangian



multiscale modelling // Journal of Physics: Conference Series. 2024. Vol. 2707, No. 1. P. 012138. IOP Publishing.

12. Gogate P.R., Pandit A.B. A review and assessment of hydrodynamic cavitation as a technology for the future // Ultrasonics Sonochemistry. 2005. Vol. 12, No. 1–2. P. 21–27.

13. Vichare N.P., Gogate P.R., Pandit A.B. Optimization of hydrodynamic cavitation using a model reaction // Chemical Engineering & Technology. 2000. Vol. 23, No. 8. P. 683–690.

14. Simpson A., Ranade V.V. Modeling hydrodynamic cavitation in venturi: Influence of venturi configuration on inception and extent of cavitation // AIChE Journal. 2019. Vol. 65, No. 1. P. 421–433.

15. Gogate P.R., Tayal R.K., Pandit A.B. Cavitation: a technology on the horizon // Current Science. 2006. P. 35–46.

16. Liu Y., Li B. Numerical Investigation of the Cavitation Characteristics in Venturi Tubes: The Role of Converging and Diverging Sections // Applied Sciences. 2023. Vol. 13, No. 13. P. 7476.

17. Zheng H., Zheng Y., Zhu J. Recent developments in hydrodynamic cavitation reactors: Cavitation mechanism, reactor design, and applications // Engineering. 2022. Vol. 19. P. 180–198.

18. Carpenter J., Badve M., Rajoriya S., George S., Saharan V.K., Pandit A.B. Hydrodynamic cavitation: An emerging technology for the intensification of various chemical and physical processes in a chemical process industry // Review of Chemical Engineering. 2017. Vol. 33. P. 433–468.

19. Abbas-Shiroodi Z., Sadeghi M.T., Baradaran S. Design and optimization of a cavitating device for Congo red decolorization: Experimental investigation and CFD simulation // Ultrasonics Sonochemistry. 2021. Vol. 71. P. 105386.

20. Kuldeep, Saharan V.K. Computational study of different Venturi and orifice type hydrodynamic cavitating devices // Journal of Hydrodynamics. 2016. Vol. 28. P. 293–305.

21. Chitsaz H.R., Omidkhah M.R., Ghobadian B., Ardjmand M. Optimizing Different Angles of Venturi in Biodiesel Production Using CFD Analysis // Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering. 2019. Vol. 38. P. 285–295.

22. Bashir T.A., Soni A.G., Mahulkar A.V., Pandit A.B. The CFD driven optimisation of a modified Venturi for cavitation activity // Canadian Journal of Chemical Engineering. 2011. Vol. 89. P. 1366–1375.

Стаття надійшла до редакції 26.09.2024 р.



D. Vitenko, T. Vitenko
Ternopil Ivan Puluj National Technical University

FLOW HYDRODYNAMICS ANALYSIS AND COMPARISON IN CAVITATION DEVICES

Summary

The hydrodynamic and cavitation characteristics of the Venturi tube proposed by Long and the investigated design were analyzed to address the issue of controlling cavitation intensity in industrial applications. The need for improved cavitation control arises because excessive cavitation can lead to material damage and energy losses, while insufficient cavitation reduces process efficiency. Precisely tuning cavitation intensity is critical for optimizing system performance in many industrial sectors, particularly in high-demand environments such as chemical production and energy generation. Adjusting cavitation flow characteristics also provides significant advantages in process control and equipment longevity. This study focused on comparing the Venturi tube design proposed by Long with an alternative model that allows for better regulation of cavitation intensity. The objective was to evaluate both designs' hydrodynamic parameters and cavitation effects.

Two apparatus configurations were modeled: Long's baseline design and the investigated version with adjustable processing modes. The study used fluid dynamics modeling in SolidWorks with the Flow Simulation module. A fine mesh was employed to ensure accuracy in analyzing flow behavior. The research was carried out for the following input parameters: flow rates in the range of 0.00117 – 0.003 m³/s, inlet pressures between 0.35-0.6 MPa, and water temperature at 293 K. Both designs were analyzed with a focus on key parameters such as velocity, pressure distribution, volume of the vapor-gas phase, and cavitation number.

The results showed higher flow velocities and lower minimum pressures for the investigated apparatus, leading to an increased volume of the vapor-gas phase. These findings indicate that the investigated design effectively controls cavitation intensity, suggesting its potential for more efficient use in industrial processes.

Key words: Hydrodynamic cavitation, Venturi tube, SolidWorks Flow Simulation, cavitation intensity, numerical modeling, energy distribution.