

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF FLUID HYDRODYNAMIC FLOW IN VENTURI NOZZLE ON INTENSITY OF CAVITATION

L. Avdeeva, A. Makarenko, E. Zhukotsky

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine

Key words:

*Hydrodynamic cavitation
Flow cavitation mixers
Venturi nozzle
Number of cavitation
Dispersion systems*

Article history:

Received 16.05.2019
Received in revised form
30.05.2019
Accepted 05.06.2019

Corresponding author:

L. Avdeeva
E-mail:
tbds_itff@ukr.net

ABSTRACT

The paper gives an overview of the main effects which accompany the occurrence of cavitation. The features of the flow in hydrodynamic static type cavitators are shown. On the basis of the conducted analysis, it is concluded that the emergence and development of hydrodynamic cavitation is influenced by a number of hydrodynamic factors: the shape of flow limits, flow parameters and critical pressure of cavitation, as well as the properties of the material: the content of air, gas or solid particles, surface tension, viscosity and so on.

Based on experimental data, some hydrodynamic parameters of a liquid flow inside a Venturi nozzle with a diameter of the neck from 0.004 m to 0.016 m were calculated. The dependences of flow rates and flow velocity inside the nozzle on the diameter of the neck of the cavitation reactor are given. The character of the dependence of the values of the numbers Re and the diameter of the nozzle neck is analyzed. It is shown that the design of the apparatus and the form of the reactor effect on the occurrence and development of cavitation effects. To characterize the cavitation phenomenon in this reactor, the value of the number of cavitation (χ) was used.

In the result of the research revealed significant differences in the hydrodynamic conditions of the occurrence and development of cavitation in the flow, depending on the change of the diameter of the nozzle neck. The smallest values of cavitation numbers ($\chi < 1$) were obtained for nozzles with a diameter of 0.004 m and 0.006 m, which indicates a high degree of hydrodynamic cavitation and a significant intensity of influence. In this case, the flow is characterized by low costs and increasing the duration of processing a certain volume, which reduces productivity and increases the energy consumption of the process. An increase of the diameter of the nozzle neck to 0.008 m or more results a gradual increase of the number of cavitation and a reduction of the intensity of the effect of cavitation effects as a result of cavitation processing. The obtained results will be used to determine the rational modes of cavitation processing of specific disperse systems.

DOI: 10.24263/2225-2924-2019-25-3-18

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГІДРОДИНАМІКИ ПОТОКУ РІДИНИ В СОПЛІ ВЕНТУРИ НА ІНТЕНСИВНІСТЬ ВИНИКНЕННЯ КАВІТАЦІЇ

Л. Ю. Авдєєва, А. А. Макаренко, Е. К. Жукотський

Інститут технічної теплофізики НАН України

У статті проведено огляд основних ефектів, які супроводжують виникнення кавітації. Показано особливості руху потоку в гідродинамічних кавітаторах статичного типу. На основі проведеного теоретичного аналізу зроблено висновок про те, що на виникнення і розвиток гідродинамічної кавітації мають вплив ряд гідродинамічних факторів: форма меж течії, параметри течії і критичний тиск $P_{\text{кав}}$, а також властивості матеріалу (вмісту пари, газу або твердих частинок, поверхневий натяг, в'язкість тощо).

На основі експериментальних даних розраховано деякі показники гідродинаміки потоку рідини всередині сопла Вентури з діаметром горловини від 0,004 м до 0,016 м. Наведено залежності витрат розчину та швидкості течії всередині сопла від діаметра горловини кавітаційного реактора. Проаналізовано характер залежності значень чисел Re від діаметра горловини сопла. Показано, що конструкція апарата і форма виконання реактора мають значний вплив на виникнення і розвиток ефектів кавітації. Для характеристики явища кавітації в реакторі використовувались значення числа кавітації (χ).

У результаті досліджень виявлено значні відмінності гідродинамічних умов виникнення і розвитку кавітації в потоці залежно від зміни прохідного діаметра горловини сопла. Найменші значення чисел кавітації ($\chi < 1$) отримано для сопел з діаметром 0,004 м та 0,006 м, що свідчить про високий ступінь розвитку гідродинамічної кавітації і значну інтенсивність впливу. Але за цих умов потік характеризується низькими витратами і зростанням тривалості обробки певного об'єму, що знижує продуктивність і підвищує енерговитрати процесу. Збільшення діаметра горловини сопла до 0,008 м і більше призводить до поступового збільшення числа кавітації та зниження інтенсивності впливу кавітаційних ефектів у результаті обробки. Отримані результати будуть використані для визначення раціональних режимів кавітаційної обробки конкретних дисперсних систем.

Ключові слова: гідродинамічна кавітація, проточні кавітаційні змішувачі, сопло Вентури, число кавітації, дисперсні системи.

Постановка проблеми. Інтенсифікація технологічних процесів пов'язана із впливом на систему різноманітних зовнішніх факторів, які дають змогу змінити в потрібному напрямку стан системи і швидкість перебігу в ній процесів переносу. Одним з ефективних методів інтенсифікації масообмінних і гідромеханічних процесів у різних галузях промисловості є використання кавітаційного впливу при обробці складних дисперсних систем. Кавітація як

явище вивчається вже досить давно, але його фізична сутність вивчена ще недостатньо повно, про що свідчить велика кількість наукових публікацій. Труднощі, пов'язані з визначенням закономірностей перебігу кавітаційних процесів, можна пояснити багатофакторністю впливу її ефектів на оброблювані системи. Незважаючи на це, дослідження пов'язані з використанням кавітації, на сьогодні є дуже актуальними через досягнення можливості проведення інтенсифікації різноманітних тепло- і масообмінних процесів у складних гетерогенних середовищах і розроблення сучасних енергоефективних технологій [1—3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проточні гідродинамічні кавітаційні апарати — це ефективне обладнання нового покоління для розчинення, змішування, диспергування, емульгування і гомогенізації в дисперсних системах типу «рідина-рідина» або «рідина-тверда речовина». Використання гідродинамічної кавітації в обладнанні цього типу дає змогу інтенсифікувати і прискорювати технологічні процеси в рідких середовищах, при цьому значно зменшуючи витрати енергії. Ефективність кавітаційних апаратів пов'язана з виникненням супутніх до кавітації ефектів, таких як ударні хвилі, кумуляція, автоколивання, вібротурбулізація, дифузія і теплообмін, які виникають при утворенні, зростанні і колапсі бульбашок. Колапс бульбашок супроводжується значним ударним впливом, а також хімічними змінами і слабким радіоактивним випромінюванням. При схлопуванні парогазова суміш, що міститься в бульбашці, стискається до тиску 10^5 Па (300 атм) і нагрівається до температур порядку декілька тисяч градусів (8000...12000 К), виникають імпульси тиску, які можуть досягати 10^3 МПа. Високі ударні імпульси при значній концентрації бульбашок в об'ємі робочої зони кавітаційного апарата сприяють тому, що питома потужність, яка підводиться до одиниці об'єму оброблюваного середовища, становить 10^4 ... 10^5 кВт/м³. Це на декілька порядків вище за питому потужність, що виділяється при обробці технологічних середовищ в ультразвукових апаратах. Весь процес виникнення, зростання і схлопування бульбашок відбувається протягом декількох мілісекунд [1; 2; 4; 5].

Високий тиск і температура всередині бульбашок призводить до розпаду молекул води і утворення радикалів з високою хімічною активністю. Відомо, що при 2000 К близько 0,01% молекул H₂O усередині бульбашки дисоціюють на вільні радикали (термоліз кавітації): водневі (H⁺) і гідроксильні (OH⁻). Ці радикали можуть рекомбінувати з утворенням електронно-збуджених станів молекул води. Під час переходу молекул води з електронно-збудженого стану в стан спокою в об'ємі води висвічується квант світла, тобто відбувається сонолюмінісценція — явище виникнення спалаху світла при схлопуванні кавітаційних пухирців. Крім того, різкий колапс кавітаційних бульбашок призводить до утворення гідравлічних ударів і, як наслідок, до створення хвилі стиснення і розтягування в рідині з ультразвуковою частотою. В результаті, створюються умови для перебігу гідромеханічних, фізичних і хімічних процесів, які при звичайних умовах здійснити важко або неможливо [3; 6; 7; 8].

Основою великої кількості відомих проточних гідродинамічних кавітаційних апаратів статичного типу є сопла Вентурі. Кавітаційний реактор таких

апаратів являє собою послідовно поєднані між собою конфузори, проточну камеру і дифузори. Конструкція апарата і форма виконання реактора впливають на величину тиску в робочій камері, виникнення і розвиток ефектів кавітації і, таким чином, на ефективність обробки. При проходженні рідини через кавітаційний реактор у потоці рідини виникають вихроутворення, відривні течії і кавітація. Ці ефекти впливають на частки фази гетерогенної системи, сприяють їхньому інтенсивному подрібненню і гомогенізації. Раптове звуження каналу викликає, зазвичай, меншу втрату енергії, ніж раптове розширення при однакових площах поперечних перерізів каналу. Втрата енергії в цьому випадку обумовлена тертям на вході у вузьку частину каналу і втратами на утворення вихорів, викликане тим, що потік на кордоні входу в циліндричну частину каналу зривається з неї і звужується, а кільцевий простір навколо звуженої частини потоку заповнюється малорухомою рідиною із завихреннями. При раптовому розширенні каналу втрати енергії пов'язані із вихроутворенням і відривом потоку від стінок, тобто на підтримку безперервного обертального руху рідких мас і постійний їх обмін [6; 7; 9; 10].

Якщо площа поперечного перерізу періодично змінюється і втрати енергії на тертя незначні, тоді в конфузійній частині каналу відбувається перетворення потенційної енергії в кінетичну, а в дифузійній — навпаки. При відсутності втрат напору на тертя перетворення енергії обернені і сумарна механічна енергія залишається незмінною. При проходженні рідини каналом відносна швидкість буде періодично змінюватися за величиною і напрямком. Динамічний вплив на частинку можливий за умови прискореного руху потоку рідини $g_c = dv/dt \neq 0$, враховуючи, що $g_c = dv/dt = \partial v/\partial t + v \cdot dv/dx$ силова дія на дисперсію з боку рідини можлива як завдяки прискоренню або гальмуванню потоку внаслідок змінення з часом об'ємної витрати рідини через канал $G_V = vS$, так і при різкій зміні площі поперечного перерізу каналу dS/dx . Під впливом сили гідродинамічної взаємодії частинок дисперсної фази з рідиною відбувається корисна робота, пов'язана з деформуванням або руйнуванням дисперсних часток [3; 10; 11].

Через те, що в конкретних дискретних зонах навкруги кожної частинки відбувається корисна робота, процес трансформації механічної енергії вже не можна вважати оберненим. Чим швидше відбувається перетворення кінетичної енергії в потенційну, тобто чим вище значення прискорення $dv/dt = v \cdot \partial v/\partial x$, тим більша частина енергії потоку іде на виконання корисної роботи з деформації і руйнування частинок [3; 8; 11].

У реальних проточних кавітаційних апаратах непродуктивні витрати енергії можна зменшити, якщо поверхні стінок каналу зробити гладкими, а профілі конфузійної і дифузійної частини оптимальними для досягнення найменших втрат напору потоку. Тож для оптимальних умов виникнення ефектів кавітації велике значення надається вибору геометричних параметрів конструкції реактора [7; 11; 12].

Мета досліджень: вивчення закономірностей зміни гідродинаміки потоку рідини в соплі Вентурі з різними діаметрами горловини.

Викладення основних результатів дослідження. Основними факторами, що впливають на виникнення і подальший розвиток кавітації в потоках рідини, є форма меж течії, параметри течії (абсолютний тиск і швидкість) і критичний тиск $p_{кр}$, при якому можуть утворюватися бульбашки або виникати каверни. Однак, крім цього, на розвиток кавітації можуть істотно впливати й інші фактори, до яких відносяться властивості рідини (наприклад, в'язкість, поверхневий натяг, параметри, що характеризують випаровування), будь-які тверді або газоподібні домішки, що можуть бути зваженими або розчиненими в рідині, і стан граничних поверхонь, включаючи їх чистоту і тріщини, в яких можуть знаходитися нерозчинені гази [3; 11; 12].

Для проведення експериментальних досліджень були використані сопла Вентурі з такими геометричними параметрами: кут розкриття конфузора 90° , довжина горловини сопла 0,02 м, кут розкриття дифузора 120° . Діаметр горловини сопла в кавітаційних реакторах змінювався від 0,004 м до 0,016 м. Як дисперсійне середовище використовувалась водопровідна вода з початковою температурою $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Витрати розчину та тиск визначалися експериментальним методом дослідження. Швидкість всередині сопла, число Рейнольдса та число кавітації визначалось аналітичним методом.

Експериментальні результати досліджень деяких показників, що характеризують гідродинаміку потоку рідини усередині сопла, наведені на рис. 1.

Отримані для цього типу кавітаційного реактора результати (рис. 1) свідчать, що зі збільшенням діаметра сопла витрати розчину, відповідно, збільшуються (рис. 1а). Причому спостерігається майже пропорційна залежність між значеннями діаметра і витратами. Швидкість потоку в соплі зменшується (рис. 1б), що можна пояснити зменшенням площі місцевого опору у вигляді сопла.

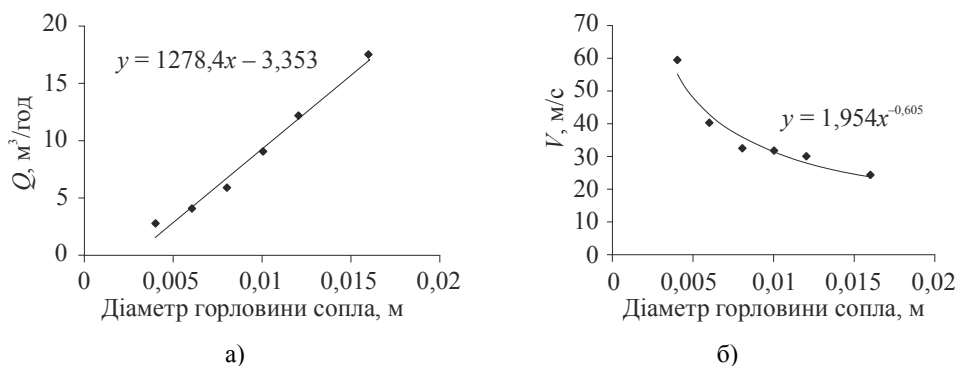


Рис. 1. Залежність витрат розчину а) та швидкості всередині сопла б) від діаметра горловини кавітаційного реактора

Інтенсивність виникнення кавітаційних ефектів залежить від швидкості руху потоку — при зростанні швидкості збільшується розрідження потоку і збільшується різниця тисків при проходженні потоку через сопло, тому явище кавітації характерне для великих швидкостей. Для напірних потоків у

трубах швидкість потоку впливає на характер руху рідини, що визначається числом Рейнольдса (Re). Цей показник описує вплив сил інерції і сил внутрішнього тертя і дає змогу поєднати фактори руху рідини: основні характеристики потоку (діаметр труби, середня швидкість) і характеристики самої рідини (густина, в'язкість). Число Re визначається за формулою (1):

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D_{\Gamma}}{\eta} = \frac{v \cdot D_{\Gamma}}{\nu} = \frac{Q \cdot D_{\Gamma}}{v \cdot A}, \quad (1)$$

де ρ — густина середовища, кг/м^3 ; v — характерна швидкість м/с ; D_{Γ} — гідравлічний діаметр, м ; η — динамічна в'язкість середовища, $\text{Па}\cdot\text{с}$; ν — кінематична в'язкість середовища, $\text{м}^2/\text{с}$; Q — об'ємні витрати потоку, $\text{м}^3/\text{с}$; A — площа перерізу каналу, наприклад, труби, м^2 .

Критерій Re використовується для дослідження, розрахунків і моделювання течії рідини [12]. Опосередковано про наявність кавітації в потоці при проходженні через дослідне сопло свідчать високі значення числа Re (рис. 2).

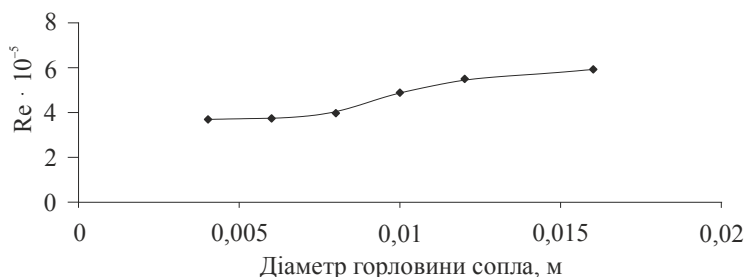


Рис. 2. Залежність числа Re від діаметра горловини сопла кавітаційного реактора

Отримана залежність має нелінійний характер (рис. 2). Як видно з рис. 2, встановлення кавітаційного режиму призводить до поступового збільшення числа Re при збільшенні діаметра горловини сопла від 0,004 м до 0,016 м. Подальше збільшення діаметра горловини призводить до зникнення перепаду тиску на вході і виході з горловини сопла і зникнення кавітаційної течії. Такий режим руху призводить до поступового зниження числа Re . При течії рідини в трубі з діаметром $d = 0,042$ м без використання сопла Вентурі число Рейнольдса має значення $Re = 288036$, що відповідає турбулентному режиму.

Як параметр для характеристики явища кавітації в реакторі і визначення ефективності впливу на потік використовувалось значення числа кавітації (χ). Кавітаційне число розраховували за формулою (2):

$$\chi = \frac{p - p_{\text{кав}}}{1/2 \rho \cdot v^2}, \quad (2)$$

де p — тиск перед соплом, Па ; v — швидкість течії в горловині сопла, м/с ; $p_{\text{кав}}$ — тиск насиченої пари, при якому виникає кавітація, Па ; ρ — густина рідини, кг/м^3 .

Відомо, що при значеннях чисел кавітації $\chi > 2$ кавітаційні ефекти відсутні або незначні, при значеннях χ від 1,0 до 2,0 кавітація має місце, а найбільша

інтенсивність дії кавітаційних ефектів характерна для $\chi < 1$ [3; 11; 12]. Залежність числа χ від діаметра сопла Вентурі наведена на рис. 3.

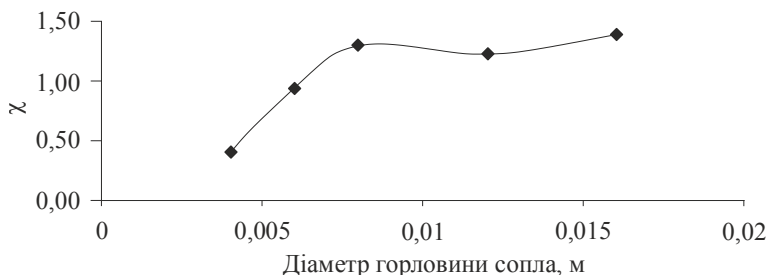


Рис. 3. Залежність числа кавітації від діаметра горловини сопла

Аналіз триманих результатів показав (рис. 3), що зі збільшенням прохідного діаметра горловини сопла Вентурі кавітаційне число збільшується. Використання сопел з горловинами від 0,004 м до 0,008 м призводить до різкого збільшення чисел χ , що свідчить про значні відмінності гідродинамічних умов виникнення і розвитку кавітації. Для сопел з діаметром 0,004 м та 0,006 м отримані найменші значення чисел кавітації, $\chi < 1$. Це свідчить про високий ступінь розвитку гідродинамічної кавітації і високу інтенсивність впливу на дисперсну систему. В цьому випадку, в результаті активної дії кумулятивних мікроструменів утворених кавітаційних пухирців досягається високий ступінь дисперсності дослідної системи. Але потік характеризується дуже низькими витратами розчину (рис. 1а), що значно збільшує тривалість обробки, знижує продуктивність і підвищує енерговитрати процесу. Збільшення діаметра горловини сопла від 0,008 м і більше призводить до поступового збільшення чисел кавітації і становлять $1 < \chi < 2$. Це свідчить про зниження інтенсивності впливу ефектів гідродинамічної кавітації в результаті обробки.

Такі ж висновки були зроблені і при аналізі залежності числа кавітації від числа Re для сопел Вентурі з діаметрами горловини від 0,004 м до 0,016 м.

Проведений аналіз показників гідродинаміки потоку і чисел кавітації, а також результати подальших досліджень фізико-хімічних і структурно-механічних властивостей дасть змогу визначити раціональні технологічні режими обробки конкретної дисперсної системи.

Висновки

На основі експериментальних даних був проведений розрахунок витрат розчину та швидкості всередині сопла показників гідродинаміки потоку рідини в соплі Вентурі з різними діаметрами горловини при кавітаційному режимі течії. Визначено, що збільшення діаметра сопла з 0,004 м до 0,016 м призводить до збільшення витрат розчину з 2,5 м³/год до 18 м³/год і зменшення швидкості потоку в середині горловини з 54 м/с до 22 м/с. Охарактеризований режим руху рідини за допомогою обрахунку числа Рейнольдса. Обрахунок числа Рейнольдса залежно від діаметра горловини сопла показав, що режим руху рідини знаходиться в турбулентному режимі. Для характеристики явища кавітації в реакторі були використані значення чисел кавітації (χ).

Результати досліджень показали, що найменше число кавітації $\chi = 0,48$ було отримано для сопел з діаметром горловини 0,004 м, що свідчить про високий ступінь розвитку гідродинамічної кавітації і високу інтенсивність впливу на дисперсну систему. Збільшення діаметра горловини сопла призводить до поступового збільшення чисел кавітації.

Література

1. Промтов М. А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов. *Вестник ТГТУ*. 2008. Т. 14, № 4. С. 861—869 с.
2. Braeutigam P., Franke M., Zhi-Lin Wu, Ondruschka B. Role of Different Parameters in the Optimization of Hydrodynamic Cavitation. *Chem. Eng. Technol.* 2010, 33. No. 6. P. 932—940.
3. Вітенько Т. М. Гідродинамічна кавітація у масообмінних, хімічних і біологічних процесах. Тернопіль: ТДТУ ім. І.Пулюя, 2009. 220 с.
4. Долинский А. А., Иваницкий Г. К. Тепломассообмен и гидродинамика в парожидкостных дисперсных средах. Київ: Наукова думка, 2008. 382 с.
5. Долинский А. А., Иваницкий Г. К. Теоретическое обоснование принципа дискретно-импульсного введения энергии. 2. Исследование поведения ансамбля паровых пузырьков. *Промышленная теплотехника* 1996. Т. 18, № 1. С. 3—20.
6. Федоткин И. М., Гулый И. С. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности (теория, расчеты и конструкции кавитационных аппаратов). Часть I. К.: Полиграфкнига, 1997. 838 с.
7. Федоткин И. М., Гулый И. С. Кавитация, кавитационная техника и технология, их использование в промышленности (теоретические основы производства, расчеты и конструкция кавитационных теплогенераторов) Часть II. Киев: АО «ОКО», 2000. 898 с.
8. Долинский А. А., Басок Б. И. Наномасштабные эффекты при дискретно-импульсной трансформации энергии. Микро- и наноразмерные процессы в технологиях ДИВЭ: темат. зб. статей / под общ. ред. А. А. Долинского; Институт технической теплофизики НАН Украины. Академперіодика, 2015. 464 с.
9. S. Brinkhorsta, E. von Lavantea, G. Wendt Experimental and numerical investigation of the cavitation-induced choked flow in a herschel venturi-tube. *Flow Measurement and Instrumentation*. 2017. Vol 54. P. 56—67.
10. Jitendra Carpenter, Suja George, Virendra Kumar Saharan Low pressure hydrodynamic cavitating device for producing highly stable oil in water emulsion: Effect of geometry and cavitation number *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 2017. Vol. 116. P. 97—104.
11. Mingda Li Adrien, Bussonnière Matthew Bronson, Zhenghe Xu, Qingxia Liu. Study of Venturi tube geometry on the hydrodynamic cavitation for the generation of microbubbles. *Minerals Engineering*. V. 132, 2019, P. 268—274.
12. Mossaz S., Colombet D., Ayela F. Hydrodynamic cavitation of binary liquid mixtures in laminar and turbulent flow regimes. *Experimental Thermal and Fluid Science*. V. 80, 2017, P. 337—347.