

УДК 532.528

ОПИС ПРОЦЕСІВ ПРИ КАВІТАЦІЇ В ЗАНУРЕНОМУ СОПЛІ

Анісімов В.В., к.т.н.,

Клименко А.В., к.т.н.,

Єрмаков П.П., д.т.н.,

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

Тел. (066) 632-06-70

Янаков В.П., к.т.н.

Тавричний державний агротехнічний університет

Тел. (0619) 42-13-06

Анотація – в статті проаналізовано процес схлопування кавітаційних бульбашок в зануреному в рідину соплі. Виділено та описано основні стадії даного процесу, описано фізичні явища, що виникають. За результатами аналізу виділено перспективні напрямки розробки нових ефективних кавітаційних сопел зануреного типу.

Ключові слова – занурене кавітаційне сопло, схлопування, кавітація.

Постановка проблеми. Кавітація вже давно застосовується в багатьох галузях промисловості, проте часто необхідна висока її інтенсивність, що не завжди забезпечується існуючим обладнанням або виникають специфічні конструктивні обмеження, що утруднюють її застосування. Тому виникає проблема створення нових, більш ефективних пристроїв для створення кавітації. Але метод «проб та помилок» не є ефективним, тому є необхідність в детальному аналізі процесу кавітації в різних його проявах для виявлення найбільш ефективних рішень в конструкції кавітаторів.

Аналіз останніх досліджень. Вперше людство зіткнулося з кавітацією в кінці XIX століття при випробуваннях швидкісних морських судів [1,2] як з суто негативним явищем. В наш час все більшого розвитку набуває використання кавітації для інтенсифікації процесів хімічної технології.

Кавітаційні технології знайшли широке застосування в багатьох галузях хімічної промисловості, зокрема в загальній хімічній, харчовій, нафтохімічній промисловостях. Найбільш поширеним застосуванням кавітації є інтенсифікація процесів тонкого перемішування,

диспергування, емульгування, абсорбції [2,3]. Також за допомогою кавітації інтенсифікують або навіть ініціюють протікання хімічних реакцій [4].

Також, за даними багатьох вчених [5] температури всередині кавітаційної бульбашки під час схлопування достатньо для проходження ядерних реакцій. Проте за відсутністю достовірних експериментальних даних, будемо вважати ці процеси лише передбаченими теоретично. Крім того, існують експериментальні дані, що свідчать про зміну електричних властивостей рідини під час кавітації [1,5], зокрема зміну електричної провідності, електричного потенціалу.

Формулювання цілей статті (постановка завдання). Задачею даної роботи є виконати системний опис фізико-хімічних процесів у зануреному кавітаційному соплі.

Основна частина. Кавітація є складним багатофакторним процесом. Для зручності подальшого аналізу кавітацію варто представити як певний макропроцес, який включає в себе значну кількість більш простих процесів. До них відносяться процеси руху рідини, масообміну, теплообміну, фазові перетворення, акустичні процеси, світлові процеси, електричні процеси і навіть, за даними деяких вчених, ядерні процеси [1].

Розглянемо загальну картину процесу кавітації для випадку зануреного кавітаційного сопла (рис. 1).

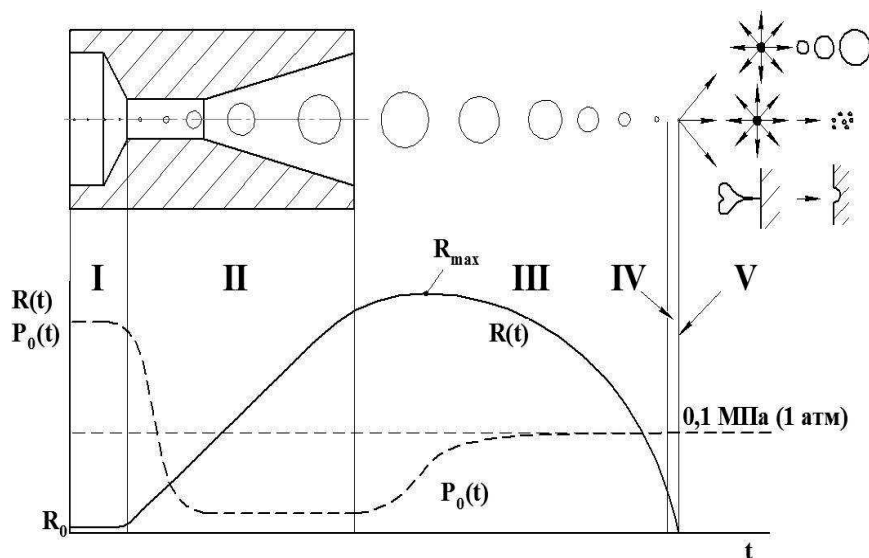


Рис. 1. Схема процесу кавітації в зануреному соплі

Наведена схема (рис. 1) описує процес існування поодинокі кавітаційної бульбашки, що в значній мірі є абстракцією, оскільки в реальному кавітаційному соплі одночасно існує велика кількість кавіта-

ційних бульбашок. Як наслідок, при вище представленому описі не враховано наступні фактори:

- 1) Взаємодія кавітаційних бульбашок. При наявності декількох кавітаційних бульбашок в соплі при певних умовах можлива їх коалесценція. Випромінювання ударної хвилі при схлопуванні впливає на схлопування інших бульбашок.
- 2) Геометричне місце кавітаційної зони. Умови для зростання кавітаційних бульбашок неоднакові в перерізі потоку. В першу чергу кавітація розвивається поблизу стінок каналу. При збільшенні ж швидкості рідини в соплі кавітація спостерігається у всьому перерізі каналу.

Весь процес існування кавітаційної бульбашки в зануреному соплі та після виходу з нього можна розділити на 4 стадії: існування в якості зародку, зростання кавітаційної бульбашки, її релеевське схлопування, нерелеевське схлопування та колапс.

1. На стадії I кавітаційна бульбашка існує в якості зародку і представляє собою мікроскопічну порожнину в рідині, заповнену сумішшю нерозчинених в рідині газів.

Ця порожнина знаходиться в рівновазі з оточуючою її рідиною. Зовнішній тиск $P_0(t)$ на бульбашку в даній стадії є максимальним. На даній стадії не відбувається ніяких суттєвих процесів, а мають місце лише незначні флуктуації.

2. На стадії II кавітаційна бульбашка потрапляє до вузької частини сопла, де зовнішній тиск $P_0(t)$ поступово спадає до рівня, який значно нижче атмосферного.

Створений вакуум призводить до зростання радіусу кавітаційної бульбашки, який представлено функцією $R(t)$ та за допомогою умовного зображення кавітаційної бульбашки. Після проходження вузької частини сопла кавітаційна бульбашка потрапляє в дифузор, де отримує додатковий ріст за рахунок додаткової зони зниженого тиску. На даній стадії спостерігаються наступні процеси. Знижений тиск в кавітаційній бульбашці призводить до випаровування рідини всередину бульбашки. Одночасно розчинений в оточуючій рідині газ дифундує в кавітаційну бульбашку. Процес росту бульбашки наближається до ізо-термічного.

3. На III стадії відбувається релеевське схлопування кавітаційної бульбашки, що вийшла з кавітаційного сопла. При цьому бульбашка потрапляє в зону атмосферного тиску, що призводить до поступового зменшення її радіуса.

Слід відмітити, що у випадку зануреного сопла одразу після виходу з сопла на невеликій ділянці ще можливе незначне зростання кавітаційної бульбашки внаслідок дії сил інерції. Після досягнення кавітаційною бульбашкою максимального розміру відбувається зменшення її радіуса з прискоренням руху стінки в напрямку до центру бульбашки. По мірі зменшення радіусу кавітаційної бульбашки тиск в ній збільшується, а процеси випаровування та дифузії всередину цієї бульбашки припиняються. Ізотермічний процес зростання сповільнюється та поступово переходить в адіабатичний. Умовно вважають [5], що релеєвське схлопування триває, доки радіус кавітаційної бульбашки не наблизиться до початкового радіусу зародку R_0 .

4. На IV стадії процес схлопування значно відрізняється від релеєвського схлопування. Внаслідок великої радіальної швидкості стінки кавітаційної бульбашки всі процеси на цій стадії є порівняно швидко текучими.

В першу чергу припиняються процеси випаровування всередину кавітаційної бульбашки. Нівелюється теплообмін між газом в бульбашці та рідиною, процес стає адіабатичним. Відбувається значне підвищення температури парогазової суміші всередині кавітаційної бульбашки. При досягненні температури всередині бульбашки значення порядку 4 000 K відбувається процес розщеплення молекул води на O та H радикали. При досягненні температури всередині бульбашки значення порядку 10 000 K відбувається випромінення спалаху сонолюмінісценції. Існує два пояснення явищу сонолюмінісценції. Згідно до теплової теорії кавітації [Маргуліс], світловий потік емітується розігрітим до надвисоких температур газом. Згідно до електричної теорії кавітації, спалахи мають електричну природу. В даний час домінуючою є теплова теорія, тому, вірогідно, сонолюмінісценція пояснюється випроміненням від газу всередині бульбашки.

5. На V стадії зростають та існують кавітаційні бульбашки. Після досягнення бульбашкою максимального стискання в оточуюче середовище випромінюється хвиля тиску, в більшості випадків така хвиля є ударною і має надвисоку амплітуду тиску.

В момент часу, коли радіус кавітаційної бульбашки є близьким до нуля, відбувається безпосередньо її схлопування, або колапс. В залежності від умов, при яких проходили всі три стадії життя кавітаційної бульбашки, можливі три варіанти її подальшої поведінки під час колапсу. При достатній кількості газової суміші в бульбашці відбувається демпфування на останній стадії схло-

пування з наступним новим циклом зростання бульбашки. Для випадку зануреного сопла таке демпфування нехарактерне.

При незначній кількості газової суміші в кавітаційній бульбашці відбувається анігіляція та розпад кавітаційної бульбашки на частини. При наявності поблизу кавітаційної бульбашки, що схлопується, твердої поверхні або твердих частинок спостерігається утворення кумулятивного струменя рідини. Такий струмінь має надвисоку швидкість рідини в ньому та призводить до ерозійного руйнування тіл будь-якої твердості. Загальний перелік процесів, що мають місце на тій чи іншій стадії існування кавітаційної бульбашки представлено в табл.1.

Таблиця 1 – Стадії життя кавітаційної бульбашки в зануреному соплі

Стадія	Умовна назва стадії	Процеси
I	Зародковий стан	Тільки флуктуаційні процеси
II	Зростання	<ul style="list-style-type: none"> - виникнення вакууму всередині кавітаційної бульбашки; - випаровування рідини всередину кавітаційної бульбашки; - дифузія газу всередину кавітаційної бульбашки.
III	Релєєвське схлопування	<ul style="list-style-type: none"> - поступовий перехід від ізотермічного стискання бульбашки до адіабатичного - плавне підвищення температури парогазової суміші в бульбашці.
IV	Нерелєєвське схлопування	<ul style="list-style-type: none"> - швидкий нагрів парогазової суміші до надвисоких температур; - утворення надвисокого тиску всередині кавітаційної бульбашки; - розпад молекул води на радикали; - сонолюмінісценція; - ядерні реакції; - електричні процеси.
V	Колапс	<ul style="list-style-type: none"> - випромінювання ударної хвилі тиску; - випромінювання акустичних коливань; - розпад кавітаційної бульбашки на частини після схлопування; - утворення кумулятивних струменів рідини.

Деякі з представлених вище процесів є мало дослідженими або навіть лише теоретично передбаченими на даний момент. Особливо це стосується проходження ядерних реакцій при схлопуванні кавітаційної бульбашки. Тим не менш, принаймні теоретично така можливість передбачена вченими, тому є необхідним вказати на неї в даній роботі. Тим не менш, представлений опис дозволяє прийняти технічні рішення стосовно застосування кавітації для інтенсифікації технологічних процесів, а також стосовно збільшення інтенсивності кавітації в зануреному соплі. Основними шляхами збільшення інтенсивності кавітації є забезпечення зростання бульбашки до якнайбільших розмірів та забезпечення якнайшвидшого схлопування кавітаційної бульбашки (рис. 2).



Рис. 2. Основні шляхи збільшення інтенсивності кавітації в соплі

При використанні першого шляху доцільним є оптимізація всіх геометричних розмірів кавітаційного сопла, таких як: кут розкриття та довжина вхідного конфузору, довжина вузької частини сопла, кут розкриття та довжина вихідного дифузору. Причому, ці параметри необхідно пов'язати з такими технологічними параметрами, як швидкість рідини в соплі, її в'язкість, температура та ін. Іншим шляхом є зміна форми кавітаційного сопла. Одним з відомих рішень є наближення форми кавітаційного сопла до форми сопла Лавалю, що має криволінійний профіль. Третім шляхом є встановлення додаткових елементів, що призводять до збільшення інтенсивності кавітації за рахунок збільшення розмірів зони низького тиску або збільшення вакууму в ній.

При використанні другого шляху також встановлюють додаткові пристрої або елементи, але тепер з метою збільшення тиску в певній локальній зоні. Причому це можуть бути як статичні елементи, що змінюють течію рідини так, щоб бульбашка раптово потрапляла в зону підвищеного тиску, так і коливальні елементи, що періодично створюють зони високого та низького тиску після сопла.

Висновки. Таким чином, кавітація в зануреному соплі є складним багатофакторним процесом, під час якого спостерігається велика кількість явищ.

1. Для кожної стадії існування кавітаційної бульбашки характерні свої процеси та явища.
2. Аналіз цих явищ дозволяє з однієї сторони намітити перспективи використання кавітації для інтенсифікації технологічних процесів.
3. Можливо іншим засобом визначити основні шляхи збільшення інтенсивності кавітації в зануреному соплі.

Література:

1. *Федоткин И.М.* Интенсификация технологических процессов пищевых производств / *И.М. Федоткин, Б.Н. Жарик, Б.И. Погоржельский.* – К. : Техніка, 1984. – 265 с.

2. *Мороз Н.А.* Абсорбция оксидов азота водой активированной посредством кавитации / *Н.А. Мороз, М.И. Ворожбян, А.Я. Лобойко, Н.Б. Маркова, В.С. Багдасарян.* // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Тематичний випуск «Хімія, хімічна технологія та екологія». – 2010. - № 52. – С. 90–94.

3. *Вітенько Т.М.* Вплив кавітаційного подрібнення твердої фази на кінетику розчинення / *Т.М. Вітенько, Я.М. Гумницький.* // Вопросы химии и химической технологии. – 2009. – №2. – С. 161–166.

4. *Вітенько Т.М.* Експериментальна оцінка хімічної дії гідродинамічної кавітації / *Т.М. Вітенько* // Вісник ТДАТУ. — 2009. — Том 14, № 2. — С. 165-170.

5. *Смородов Е.А.* Физика и химия кавитации / *Е.А. Смородов, Р.Н. Галиахметов, М.А. Ильгамов.* – М.: Наука, 2008. – 228 с.

ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРИ КАВИТАЦИИ В ПОГРУЖЁННОМ СОПЛЕ

Анисимов В.В., Клименко А.В., Ермаков П.П., Янаков В.П.

Аннотация – в статье проанализировано процесс схлопывания кавитационных пузырей в погружённом в жидкость сопле. Выделено и описано основные стадии данного процесса, описано возникающие физические явления. По результатам анализа выделено перспективные направления разработки новых эффективных кавитационных сопел погруженного типа.

DESCRIPTION OF PROCESSES DURING THE CAVITATION IN A SIDED NOZZLE

V. Anisimov, A. Klimenko, P. Ermakov, V. Yanakov

Summary

The article analyzes the process of collapse of cavitation bubbles in a nozzle immersed in a liquid. The main stages of this process are singled out and described, and the emerging physical phenomena are described. Based on the results of the analysis, promising directions for the development of new effective cavitation nozzles of immersed type are highlighted.