

## ВСТУП

Згідно з енциклопедичним визначенням кавітація (від лат. *Cavitas* – пуста, порожнина) (рос. – кавитация, англ. – *cavitation*, нім. – *Blasenbildung*) – утворення всередині рідини порожнин, заповнених газом, паром або їхньою сумішшю (кавітаційних бульбашок), тобто порушення суцільності рідин. У загальнішому розумінні кавітація – це процес пароутворення і подальшої конденсації пухирців повітря чи газів у рідинному потоці, що супроводжується утворенням у рідині полостей (кавітаційних пухирців, бульбашок чи каверн), заповнених паром рідини, у якій вони виникають, та гідравлічними ударами під час заплескування. Виникає кавітація у результаті стрімкого місцевого пониження тиску в рідині до певного критичного значення  $p_{кр}$ , яке може відбуватись або у разі збільшення швидкості рідини (гідродинамічна кавітація), або при проходженні акустичної хвилі значної інтенсивності під час напівперіоду розрідження (акустична кавітація). У реальних рідинах значення  $p_{кр}$  близьке до тиску насиченої пари цієї рідини за певної температури.

Чи не вперше із кавітаційними явищами людство стикнулося ще у XVIII ст. Тоді завдяки стрімкому розвитку машинобудування та створенню доволі досконалих двигунів внутрішнього згорання істотно – до 7–10 кабельтових – зросла швидкість морських суден та кораблів. Однак через підвищене ерозійне руйнування корабельних гвинтів при високих обертах на торговельних та транспортних суднах від таких режимів роботи двигунів змушені були відмовитись. Причиною цього була кавітація, яка обумовлюється розривами суцільності рідини під впливом значних розтягувальних напружень у ній, зумовлених

високими швидкостями переміщень у воді лопатей гребних гвинтів. Кавітаційні явища супроводжуються миттєвими утвореннями парогазових мікробульбашок, які завдяки змінам тисків у рідині швидко розширюються, стискаються та сплескують чи пульсують, відриваючи від поверхонь збурюючих кавітацію рухомих у рідині твердих тіл мікрочастки їх матеріалу. А оскільки за короткотривалі проміжки часу в незначних об'ємах рідини при цьому формуються і сплескують міриади мікробульбашок, процеси руйнування, які супроводжують кавітацію, доволі швидкоплинні.

Подібна ситуація із морським транспортом повторилась і у середині минулого ХХ ст. Створення швидкісних катерів на підводних крилах, які завдяки потужному приводу та досконалій аеродинаміці на швидкостях понад 50–60 км/год піднімаються над водою і опираються на неї лише спеціальним підводним крилом, дало змогу розвивати швидкості і понад 100 км/год. Та знову “нагадала” про себе кавітація! За таких високих швидкостей переміщень у воді “твердого тіла”, тобто підводного крила, кавітаційна ерозія доволі швидко впродовж декількох десятків годин експлуатації його руйнує.

Не менших проблем завдає кавітація і проєктантам гідрозапірної апаратури, де її прояви супроводжуються не лише руйнацією вартісних і відповідальних вузлів, а і неприйнятними вібраціями, звуковими навантаженнями та, що найнебезпечніше, можливим руйнуванням трубопроводів через стрімкі резонансні перепади тисків.

Траплялись у мореплавстві і зворотні позитивні приклади кавітаційних впливів. Так, на 50–75 % зростає швидкість підводних військових торпед завдяки збуренню попереду них у водній товщі кавітаційного поля, яке доволі в'язка рідина трансформує у значно легше за проникністю газорідинне.

Навіть ці приклади із “морської справи” переконливо підтверджують, що унікальне природне явище – так звана “кавітація” – може мати як позитивні, так і негативні прояви. Отже, проявивши себе на початку минулого століття як доволі екзотичне явище, що супроводжувалось за умов його збурення ультразвуком ще і незвичними ефектами сонарного світла, названого згодом сонолюмінесценцією, не прогнозованою на той час видозміною структури та властивостей оброблюваних рідин, кавітація стала доволі потужним засобом енергетичного впливу на оброблюване середовище: на зміну лабораторним дослідженням її почали доволі активно застосовувати у промисловості.

Сприяли цьому, без сумніву, глибокі теоретичні та практичні дослідження гідродинаміки, викладені у фундаментальних працях Г. Гельмгольца, Г. Кірхгофа, Л. Бріллюєна, Ф. Мітчелла, М. Жуковського, Д. Бернуллі та інших відомих світові науковців. Результати їх теоретичних досліджень продовжили і довели до можливостей промислового використання для інтенсифікації різноманітних хіміко-технологічних процесів та вдосконалення гідроапаратури дослідники І. Пірсол, А. Пернік, Ю. Левківський, З. Арзуманов, Р. Кнеп, В. Акулічев, А. Розенберг, М. Маргуліс, І. Ельпінер. Певний і доволі вагомий доробок у дослідженнях кавітаційних процесів по праву належить і науковцям України, зокрема наукових шкіл Національного університету “Київський політехнічний інститут” (І.М. Федоткін, А.Ф. Немчина, М.А. Балабуткіна, М.А. Промтова, О.І. Некоза, В.М. Івченко), Національного університету “Львівська політехніка” (Є.М. Мокрий, В.Л. Старчевський, І.С. Афтаназів, Л.І. Шевчук, І.З. Коваль, О.І. Строган), Тернопільського державного університету ім. І. Пулюя (А.Д. Молчанов, Т.М. Вітенько та ін.) та Хмельницького національного університету “Поділля” (Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв).

Унікальність технологічних можливостей кавітації зумовлена перш за все періодичним у часі потужним (до  $15 \text{ Вт/см}^3$ ) енергетичним впливом на оброблювані рідини, супутніми явищами утворення ударних мікрохвиль, фазовими переходами, що відбуваються на поверхні мікробульбашок, хімічними перетвореннями, що у результаті не лише значно пришвидшують перебіг хімічних реакцій, особливо окисно-відновних, а і спроможні видозмінити структурну будову оброблюваних матеріалів та середовищ. Все це сприяло не лише активному дослідженню кавітації як фізичного явища, а і доволі широкому сьогодні промислового її застосуванню для процесів дегазації, стерилізації, активації, диспергування, емульгування, біологічного знезараження тощо.

Закономірно, що унікальні технологічні можливості кавітаційної обробки рідин спонукали дослідників не лише до вивчення галузей її ефективного застосування, а й до активного пошуку різноманітних фізичних методів її збурення. Наслідком цього була поява низки методів збурення кавітації, відмінних у джерелах та засобах енергетичного впливу на рідину та об'єднаних кінцевою метою – формування у рідині кавітаційного поля певної інтенсивності. Деякі з них, зокрема методи збурення перемінними магнітними полями, так і залишились лише об'єктами лабораторних досліджень. Інші, наприклад, зорієнтовані на використання явища “холодного кипіння”, тобто

активного виділення великої кількості бульбашок розчиненого в рідині газу в газорідних сумішах за стрімкого пониження тиску, доволі поширені в процесах тепло- та масообміну. Так звані електричні методи збурення кавітації за допомогою іскрового розряду та імпульсного пропускання струму високої напруги застосовують для обробки незначних об'ємів рідин. Вони ґрунтуються на ефекті “електрогідравлічного удару”, який супроводжується розривами суцільностей потоку в оброблюваній рідині із подальшим поширенням ударних хвиль на проміжку між зануреними у рідину електродами. У результаті електричного пробоя в рідині і потоці рідини, що оточує ділянку розряду, формуються високоімпульсні тиски, які збурюють кавітаційне поле доволі високої інтенсивності. Однак через те, що енергія сферичної ударної хвилі обернено пропорційна квадрату відстані від ділянки електричного розряду, ударна хвиля швидко загасає. Це зумовлює істотні енергозатрати і незначну продуктивність методів цієї групи та обмежене їх використання у виробничих умовах.

Значно ефективнішим виявився ультразвуковий кавітаційний метод ініціювання та активації окиснювально-відновлювальних реакцій у рідинах. Основою його використання в хіміко-технологічних процесах стали дані теоретико-експериментальних досліджень явища збурення кавітації в рідинах внаслідок дії на рідину ультразвуку із частотою 22 кГц або 44 кГц [24, 25, 36–38]. Суть ультразвукового методу полягає у застосуванні коливань ультразвукової частоти для створення умов росту ядер кавітації, якими є завжди наявні в рідині різноманітні газові включення. Збіг частоти власних коливань ядер кавітації із частотою ультразвуку збурює явище резонансу, яке супроводжується миттєвим розширенням з подальшим сплескуванням кавітаційних бульбашок. У разі сплескування кавітаційних бульбашок нагромаджена потенціальна енергія рідини, що оточує бульбашку, трансформується в кінетичну. Цей процес завершується в момент руйнування бульбашки, а корисна потужність виділяється у вигляді енергетичного імпульсу. При цьому навколо кожної сплеснутої кавітаційної бульбашки генерується сферична ударна хвиля, а кожна сплеснута бульбашка є джерелом трьох–чотирьох сотень, а то і тисяч чергових зародків кавітаційних каверн, тобто процес набуває лавиноподібного характеру. Поєднуючись щомиттєво між собою, ударні хвилі сусідніх заплеснутих кавітаційних бульбашок формують у невеликому об'ємі доволі потужне енергетичне поле. У результаті значно інтенсифікуються окисні реакції і,

відповідно, пов'язані з цим очисні процеси, зокрема водоочищення та знезараження води від біологічних забруднень.

Однак проходження ультразвуку крізь рідину супроводжується значними втратами енергії акустичних хвиль, зумовленими розсіюванням ультразвуку на неоднорідностях багатофазного середовища. Тому збурення кавітаційних явищ ультразвуком ефективно лише у незначних об'ємах рідини (як правило, до 500 мл), енергозатрати на обробку одиниці об'єму рідини доволі значні, що обмежує сьогодні промислове використання ультразвукової кавітації. Але завдяки широкому діапазону регулювання інтенсивності формованого ультразвуком кавітаційного поля, високому рівню енергетичного впливу на оброблюване середовище цей метод по праву все ще залишається "еталонним" при дослідженнях технологічних можливостей кавітаційної обробки, при порівнянні ефективності її різновидів, зіставленні енергетичних та грошових затрат на досягнення певного кінцевого результату тих чи інших впливів на рідини іншими хіміко-фізичними методами.

Із-поміж різноманітних методів збурення кавітаційних явищ у рідинах (ультразвукових, електромагнітних, газонаповнюючих тощо) найпоширеніші у промисловості через їх придатність для обробки значних об'ємів та обсягів рідин методи гідростатичного та гідродинамічного збурення кавітації [18, 19, 41, 42, 65, 66]. Перевагами методів гідродинамічного збурення кавітації є висока продуктивність, простота реалізації, незначні питомі (на одиницю об'єму рідини) енергозатрати тощо. Як правило, збурення гідродинамічних кавітаційних явищ у рідинах реалізують у результаті механічних рухів у них твердих тіл за певних швидкостей їх відносних переміщень відносно рідини. Це зокрема методи збурення кавітації віброуючими в рідині пластинами та обертовими в рідині лопатями із виступами-збурювачами тощо.

Переважно в гідродинамічних кавітаторах енергія, необхідна для створення кавітації, підводиться безпосередньо робочим органом, що обертається (крильчатка, гвинт, ротор тощо). Механізм впливу гідродинамічного кавітаційного поля на технологічні середовища ґрунтується на кумулятивній гіпотезі, згідно з якою в завершальній стадії сплескування бульбашок виникають мікроструминки високого енергетичного потенціалу. Внаслідок таких явищ створюються умови для інтенсифікації окиснювально-відновлювальних реакцій у рідинах, масообмінних процесів й екстрагування тощо. Ефекти, які супроводжують кавітацію, також впливають на оброблюване середовище, змінюючи

його фізико-хімічні властивості, що є важливим для очисних процесів, які описуються хімічною кінетикою. Однак, на відміну від ультразвукової кавітації, гідродинамічна характеризується меншою інтенсивністю утворення кавітаційних бульбашок, а отже, і значно нижчою ефективністю. Крім того, наявність рухомих у рідині віброуючих пластини чи обертових лопатей, їх приводів рухів та перетворювальних механізмів не лише зумовлює значну енергозатратність гідродинамічного способу збурення кавітації, а й істотно знижує надійність та довговічність обладнання, що його реалізує. Певним недоліком є і дуже обмежена спроможність регулювання технологічних параметрів гідродинамічної кавітації, оскільки кавітаційний режим у рідині зароджується та існує у вузькому діапазоні лише певних частот і швидкостей відносних механічних переміщень збурювачів (пластин чи лопатей). Відповідно цим зумовлені й обмеження у регулюванні кінцевої якості готового продукту.

Загалом гідростатичним, гідродинамічним та ультразвуковим методами сьогодні й обмежуються можливості промислового застосування кавітації.

Однак і тут є певні обмеження, які проявляються у незначній продуктивності високоефективної ультразвукової кавітаційної обробки та в незначному рівні питомої енергії її різновиду – високопродуктивної гідродинамічної кавітаційної обробки. Враховуючи незаперечні переваги кавітаційної обробки рідин, особливо різноплановість її технологічних можливостей (від біологічного знезараження води до підвищення ефективності каталізаторів), явною стає доцільність не лише поглибленого вивчення та дослідження технологічних можливостей кавітаційної обробки, а і наукових пошуків у напрямі створення досконалішого її різновиду, який органічно поєднував би ефективність ультразвукової із продуктивністю гідродинамічної обробок.

Враховуючи, що із умовно виділених трьох груп кавітаційних явищ, які класифіковано як хибну, газову та парову кавітації, ультразвукова за ступенем інтенсивності формованого нею кавітаційного поля належить до найінтенсивнішого різновиду типу “парова”, гідродинамічна за цим самим показником, умовно ближча до “хибної”. Новостворений метод, поєднуючи переваги своїх попередників, очевидно, має посідати проміжну між вищеозначеними позицію, тобто належати до групи “газової” кавітації.

Отже, з одного боку, лабораторними дослідженнями та практикою промислового використання переконливо доведено високу ефективність застосування кавітаційних явищ у рідинах для ініціювання та активації різноманітних

окисно-відновних процесів, зокрема і для операцій водопідготовки та водоочищення. З іншого боку, треба визнати, що, на жаль, все ще відсутні як простий та економічний метод збурення і стабільного підтримання кавітації в трубопроводах значних перерізів, так і продуктивне високоефективне обладнання для його реалізації в умовах виробництва.

Тому актуальними залишаються дослідження, спрямовані на створення сучасних новітніх технологій кавітаційної обробки, на вдосконалення наявних та створення досконаліших із позицій забезпечення високої якості та придатності для промислового застосування методів, зокрема нових різновидів методів кавітаційного водоочищення, спроможних поєднувати високий ступінь очищення води із значною продуктивністю, та обладнання для їх реалізації.

Певною мірою означеним вимогам відповідає створений у Національному університеті “Львівська політехніка” метод віброрезонансної кавітаційної обробки рідин. Його специфічною особливістю є збурення кавітаційних процесів в оброблюваних рідинах підведенням до резонансного коливного режиму наявних у рідинах зародків кавітації завдяки періодичному енергетичному впливу на них віброуючих у рідинному потоці збурювачів кавітації, як правило, твердих тіл. Підведення до резонансу коливних рухів зародків кавітації при цьому забезпечують підбором (вибором) частот коливань збурювачів кавітації наближеними чи кратними власним частотам коливань зародків кавітації. У результаті в резонансному режимі коливань зародків кавітації обробляють рідини в режимі активної “газової” кавітації, забезпечуючи високу, наближену до ультразвукової, інтенсивність кавітаційного поля, а для підтримання стабільного резонансного режиму ззовні необхідна мінімальна енергія. Отже, метод віброрезонансної кавітаційної обробки рідин забезпечує високопродуктивну дискретну чи неперервну обробку рідин, потребує лише незначної питомої (на одиницю об’єму оброблюваного середовища) енергії, що відкриває для нього добрі перспективи у використанні не лише для обробки рідин різноманітних технологічних процесів, а, що особливо важливо, для технологічної водопідготовки та підготовки води побутового використання. Саме питну та побутову води найширше повсякдень використовує людство, саме до них висуваються найвищі вимоги щодо якості. Обсяги щоденного їх використання обчислюються мільйонами кубів, і створення високопродуктивного енергоощадного обладнання для покращення властивостей побутової та питної води – завдання актуальне і надважливе.

Перші експериментальні дослідження переконливо підтвердили відповідність стандартам параметрів та якості обробленої віброрезонансною кавітаційною обробкою питної та побутової води, що, враховуючи високу продуктивність цього методу, дає певну надію на широке його побутове та промислове використання. Однак на заваді цьому, враховуючи вагомість та відповідальність водопідготовки для людства, постає відсутність ґрунтовних досліджень технологічних можливостей новоствореного методу, даних щодо тривалості збереження обробленими рідинами набутих після віброрезонансної кавітаційної обробки властивостей, знання її кінематики та динаміки формування газорідних сумішей та взаємодії виконавчих органів обладнання тощо, що і є основною метою цього дослідження авторів.