



## KAPITEL 2 / CHAPTER 2<sup>2</sup> WASTEWATER TREATMENT USING CAVITATION EFFECTS

DOI: 10.30890/2709-2313.2023-20-02-014

### Вступ

Сучасні вимоги до скидів стічних вод встановлюють жорсткі обмеження на залишковий вміст реагентів, що використовуються для знезараження рідин, вміст шкідливих та небезпечних речовин. У зв'язку з цим зростає інтерес до безреагентних методів обробки рідких середовищ. Безреагентні методи очищення та дезінфекції не забруднюють природне середовище хімічними речовинами, не надають шкідливого чи подразнюючого впливу на організм людини при контакті з очищеною водою та іншими рідинами. В даний час перспективні нові екологічні методи знезараження рідин за рахунок їх фізичної обробки та зменшення кількості хімічних реагентів, що застосовуються для дезінфекції. До таких методів відносяться ультрафіолетове опромінення, електророзрядна, кавітаційна обробка та інші способи фізичного впливу на рідину. При порівнянні різних методів знезараження кавітація є недорогим способом обробки рідини. Якщо фінансові витрати на кавітаційну дезінфекцію одиниці об'єму питної води прийняти за одиницю, то витрати на ультрафіолетову обробку більші приблизно в 1,6 раз, на хлорування – у 3 рази, озонування – у 10 разів у порівнянні з витратами на кавітаційну обробку рідини [1]. Кавітаційні технології показують високу ефективність для інтенсифікації хіміко-технологічних процесів у рідинах, у тому числі й для їх очищення, пастеризації та знезараження [2-5].

Метою роботи є проведення огляду для аналізу переваг та недоліків кавітаційної обробки стічної води різного походження.

### 2.1. Знезараження стічних вод кавітаційною обробкою

Кавітація є засобом локальної концентрації енергії низької щільності у високу щільність енергії, пов'язану з пульсаціями і захопуванням кавітаційних бульбашок. У фазі розрідження акустичної хвилі або за рахунок місцевого

<sup>2</sup>Authors: Obodovych O.M., Sydorenko V.V., Tselen B.Y., Stepanova O.E.



зниження тиску, наприклад при обтіканні твердого тіла, у рідині утворюються каверни. У фазі стискування під впливом зовнішнього тиску і сил поверхневого натягу каверна захоплюється, а пара конденсується на межі розділу фаз. Через стінки каверни в неї дифундує розчинений у рідині газ, який потім піддається сильному адіабатичному стисненню. У момент зхлопування кавітаційної каверни тиск і температура газу локально можуть досягти значних величин (за розрахунковими даними до 100 МПа та до 10 000 °С) [6].

Енергії, що виділяється в процесі зхлопування бульбашки, достатньо для збудження, іонізації та дисоціації молекул води, газів та речовин з високою пружністю пари всередині кавітаційної порожнини. На цій стадії будь-який із присутніх газів є активним компонентом, беручи участь у передачі енергії збудження, перезарядки та інших процесах. При зхлопуванні кавітаційної бульбашки в розчин переходять радикали Н, ОН, іони та електрони малої енергії, що утворилися в газовій фазі при розщепленні молекули  $\text{H}_2\text{O}$  та речовин з високою пружністю пари, продукти їх взаємодії та часткових рекомбінацій, а також метастабільні збуджені молекули  $\text{H}_2\text{O}$ . Незалежно від природи розчинених речовин, дія кавітації на воду призводить до зміни її фізико-хімічних властивостей: збільшення рН, електропровідності води, збільшення кількості вільних іонів та активних радикалів, структуризації та активації молекул [7-8]. Основну бактерицидну дію на мікрофлору у воді надають пероксид водню та радикали ОН, які утворюються при дисоціації молекул води в кавітаційних утвореннях [2].

Експериментальні дослідження з кавітаційної обробки води в роторному імпульсному апараті (РІА) показали, що відбувається збільшення значення рН. Після припинення кавітаційної обробки води переважають зворотні хімічні реакції і рН за 48...72 год. знижується до вихідної величини.

При кавітаційному впливі на воду руйнуються колоїди та частинки, всередині яких можуть утримуватися бактерії, мікроорганізми позбавляються захисту перед іншими хімічними та фізичними впливами кавітації. Бактерицидна дія кавітації прямопропорційна до її інтенсивності, кратності або часу обробки. При застосуванні кавітації можливо дробити великі молекули органіки, що є центрами утворення кавітаційних бульбашок так само, як і мікроби є центрами тяжіння кавітаційних утворень. За розміром мікроби можна порівняти з великими молекулами органічних сполук, з молекулами важких нафтопродуктів [1].



Вплив кумулятивних струменів рідини, локальні пульсації тиску та температури при зхлопуванні кавітаційних бульбашок здатні викликати знищення бактерій, що використовується при знезараженні рідких продуктів та розчинів [2-4]. Проведені дослідження з кавітаційної обробки стічної побутової води показали, що кількість загальних колиформних бактерій (ЗКБ) від кавітаційного впливу зменшується у 100 тис. разів, термотолерантних бактерій (ТКБ) – у 60 тис. разів, колифагів (бактеріальних вірусів) – у 80 разів.

Практично повне знищення бактерій у стічній воді при кавітаційній обробці в РІА досягалося за 10 циклів, в проточному гідродинамічному кавітаторі (ПГК) з додаванням 0,1 % розчину гіпохлориту натрія (ГХН) – за 5 циклів.

Зіставлення даних з обробки стічної води та величин чисел кавітації в РІА та ПГК дозволяє зробити висновок, що кавітація прямопропорційно впливає на ефективність бактерицидної обробки в гідродинамічному устаткуванні. При обробці стічної води у промисловому РІА-250 можливе повне знищення бактерій за 10 циклів без хімічних реагентів. При обробці стічної води в лабораторному ПГК можливе повне знищення бактерій за 5 циклів обробки з додаванням не менше ніж 0,1 % розчину ГХН. При вмісті у воді 0,1-0,2 % ГХН вона відповідає нормативним вимогам щодо рН та вмісту ЗКБ та ТКБ. Кавітаційна обробка стічної води з введенням невеликої кількості окислювача (гіпохлориту натрію) дає синергетичний ефект і дозволяє знизити в кілька разів кількість хімічних реагентів, що застосовуються для знезараження стічної води [9].

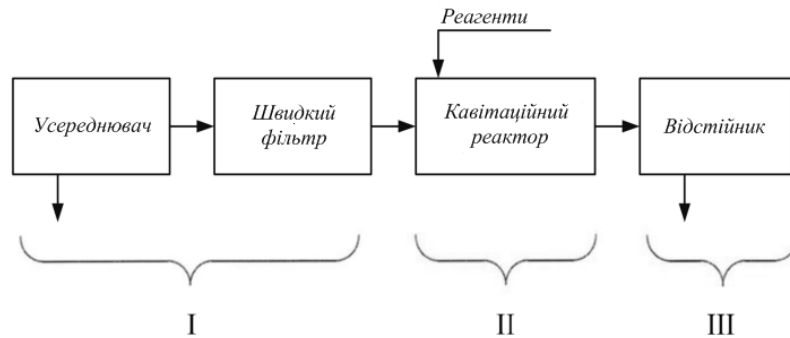
## **2.2. Апаратурне оформлення технологічних схем із впровадженням вузла кавітаційної обробки води**

Пропоновані сучасні технічні рішення по очищенню стічних вод об'єктів теплоенергетики повинні відповідати низці вимог, а саме бути енергоресурсозберігаючими, екологічно безпечними, економічно доцільними і водночас високоефективними.

Технологія очищення стічних вод, які утворюються на теплоенергетичних підприємствах, що містять нафтопродукти та біоорганізми, в основі якої лежить кавітаційний вплив, відповідає зазначеним вимогам. Крім того, очищена за цією технологією вода за фізикохімічним складом відповідає стандартам Європейського союзу до технічної води.



Кавітаційний реактор може бути включений до будь-якого з етапів типових технологічних схем очищення. На рис. 1, 2 представлені апробовані принципові схеми очищення нафтовмісних стічних вод з використанням кавітаційної установки. Схема очищення нафтовмісних стічних вод фільтрацією з доочищенням в кавітаційному роторному реакторі представлена на рис. 1.



**Рисунок 1 – Схема очищення нафтовмісних стічних вод з доочищенням у кавітаційному роторному реакторі [10]**

Технологічна схема включає: коагуляційне осадження та фільтрування домішок на першому ступені; кавітаційну обробку освітленого стоку на другому ступені; осадження продуктів розкладання та адсорбованих інтермедіатів на третьому ступені очищення.

Ступені обробки стоків, що включають фізико-хімічне очищення, підмішування, відстоювання, реалізуються традиційними способами, залежно від складу і витрати води, що очищається.

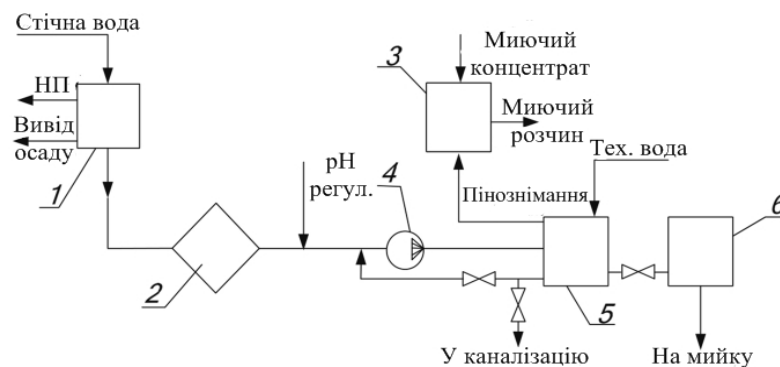
Основним ступенем очищення у цій схемі є використання технології очищення з урахуванням ефектів кавітації для розкладання важко окислюваних речовин.

Пропонований спосіб очищення можна істотно інтенсифікувати шляхом додавання невеликої кількості окислювача в кавітаційну зону для ініціювання радикально-ланцюгових реакцій окислення субстратів і активування молекул води. Як окислювач може застосовуватися пероксид водню, озон, двовалентне залізо та ін.

Згідно з проведеними дослідженнями, повне видалення всіх забруднювачів потребує значних витрат енергії, а також веде до інтенсивного абразивного зносу обладнання від завислих речовин. Тому пропонується провести початкове освітлення стоку фізико-хімічними методами для відокремлення від неемульгованих нафтопродуктів та великих завислих речовин.



Технологічна схема очищення нафтовмісних стічних вод з домішками поверхнево-активних речовин (ПАР) та неіоногенних ПАР представлена на рис. 2. Дана схема працює наступним чином: стічна вода спочатку потрапляє у відстійник з вбудованою песколункою 1, де відокремлюється від великих зависей і неемульгованих нафтопродуктів, потім проходить через швидкий фільтр 2, де очищається від дрібнодисперсних зависей, попередньо очищена вода потрапляє в резервуар з кавітуючою установкою 5, де очищається від емульгованих нафтопродуктів, а піна, що утворюється при перемішуванні середовища, знімається пінознімачем і акумулюється в ємності для миючого концентрату 3 і знову надходить на мийку, вода транспортується в резервуар чистої води 6 для подальшого використання.



**Рисунок 2 – Схема очищення нафтовмісних стічних вод з домішками ПАР та НПАР з доочищенням у кавітаторі лопатного типу: 1 – відстійник з вбудованою песколункою; 2 – швидкий фільтр; 3 – ємність миючого концентрату; 4 – насос; 5 – резервуар з кавітуючою установкою; 6 – резервуар чистої води.**

Глибоче очищення стічних вод необхідне перед використанням їх у системах повторного та оборотного водопостачання теплоенергетичних промислових підприємств, переважно використання цих вод знаходять у системах охолоджуючого оборотного водопостачання, а також у ряді технологічних операцій, де вимоги до води приблизно відповідають показникам якості вод відкритих вододжерел, у деяких випадках ці вимоги можуть бути менш жорсткими, ніж до якості води перед скиданням у водоймища [10].



### 2.3. Кавітація як одне із явищ дискретно-імпульсного введення енергії

Складні проблеми гідродинамічного впливу на багатоконпонентні рідкі середовища успішно вирішуються при застосуванні методу дискретно-імпульсного введення енергії – принципово нового способу інтенсифікації гідродинамічних та тепломасообмінних процесів. Принцип дискретно-імпульсного введення та трансформації енергії (ДІВЕ) був запропонований у роботі [11] як узагальнюючий метод спрямованого, локального та інтенсивного використання концентрованої енергії в рідинних дисперсних системах. Фізичні явища динаміки основних елементів ДІВЕ надалі були теоретично досліджені в літературі [12], а технологічні та інженерні програми цього принципу представлені в літературі [13]. Найбільш повно і послідовно принцип ДІВЕ до теперішнього часу розглянуто в монографії [14], а процеси тепломасообміну та гідроаеродинаміки, що супроводжують на макрорівні явища ДІВЕ, викладені в наукових публікаціях [15-16].

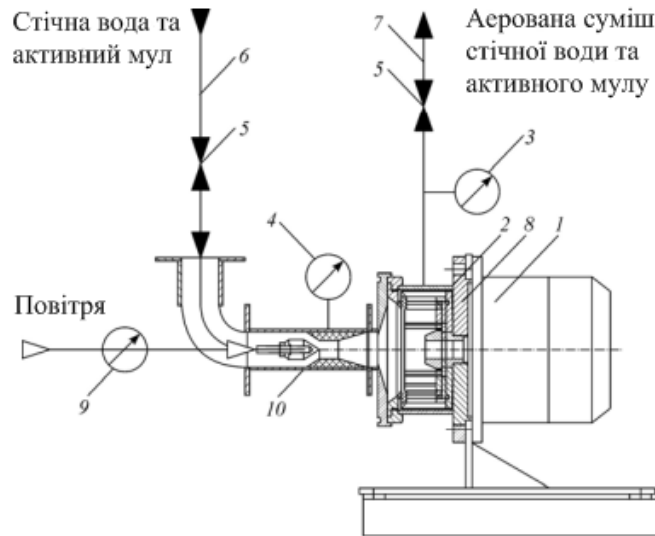
Ідея ДІВЕ полягає в тому, щоб попередньо стаціонарно введену та довільним чином розподілену в робочому обсязі енергію акумулювати (сконцентрувати) у локальних дискретних точках системи та надалі імпульсно реалізувати для досягнення необхідних теплофізичних ефектів. Мета ДІВЕ полягає в інтенсифікації тепломасообмінних та гідродинамічних процесів у технологічних середовищах, а також створенні методики їх оптимізації та способів управління ними.

Реалізація методу ДІВЕ передбачає створення великої кількості рівномірно розподілених у дисперсному середовищі робочих органів або робочих елементів, які трансформують стаціонарну теплову, механічну або інші види енергії в енергетично потужні імпульси, дискретні в часі та просторі. Супроводжують ці явища ударні хвилі, міжфазна турбулентність, мікрокавітація, проникаючі кумулятивні мікрострумені, вихори викликають на міжфазних поверхнях нестійкості типу Релея-Гейлора або Кельвіна-Гельмгольца, що призводить до інтенсивного дроблення дисперсних фаз та теплоперенесення. Подібні ефекти часто недосяжні при використанні традиційних методів при обробці дисперсних середовищ навіть за значно більшого рівня питомих енерговитрат.

Реалізується метод ДІВЕ у багатьох видах тепломасообмінного обладнання, але найчастіше у роторно-пульсаційних апаратах різних конструкцій [17]. Для інтенсифікації процесу аерації та масопереносу у технології очищення стічних



вод в ІТТФ НАНУ було створено аератор-окислювач роторного типу (АОРТ), схема якого представлена на рис. 3.



**Рисунок 3 – Схема аератора-окислювача роторного типу: 1 – електродвигун; 2 – роторно-пульсаційний вузол; 3 – манометр для вимірювання тиску на виході з роторно-пульсаційного вузла; 4 – вакуумметр для вимірювання розрідження у вхідному патрубку; 5 – двоходовий кран; 6 – приймальний трубопровід; 7 – випускний трубопровід; 8 – корпус роторно-пульсаційного апарату; 9 – ротаметр; 10 – ежекторний вузол.**

Роторно-пульсаційний вузол (РПВ) аератора-окислювача складається з двох роторів, з'єднаних гвинтами, і є єдиним роторним вузлом (РВ) статора і робочого колеса відцентрового насоса (крильчатки).

Робота АОРТ здійснюється в такий спосіб. Через приймальний трубопровід 6 суміш стічної води та активного мулу прямує в РПА. Робоче колесо відцентрового насоса, обертаючись, створює у вхідному патрубку розрядження, за рахунок якого атмосферне повітря подається в систему. Двоходовий кран 5 дозволяє регулювати подачу повітря. Таким чином, формується водоповітряна суміш, яка, проходячи через РПВ, піддається впливу ударних хвиль, міжфазної турбулентності, мікрокавітації та вихорів, що призводить до інтенсивного дроблення бульбашок повітря, дисперсних включень та збільшення площі поверхні контакту фаз. Завдяки цьому збільшується швидкість масопереносу кисню з газової фази в рідку, транспортування його по об'єму рідкої фази та



адсорбція на поверхні пластівців активного мулу, які вважаються умовно твердою фазою. Далі відбувається біологічне окиснення органічних забруднень мікроорганізмами активного мулу. Аерована та частково окислена суміш стічної води, бульбашки повітря та активного мулу через випускний трубопровід 7 спрямовується або на рециркуляцію (повторну обробку), або у вторинний відстійник.

## **Висновки**

Аналіз наявних досліджень з кавітаційного очищення і знезараження рідких середовищ показав, що використання різного виду тепломасообмінного обладнання, в якому реалізуються кавітаційні ефекти, є новою перспективною, енергетично маловитратною, безвідходною і безреагентною технологією очищення стічних вод підприємств різних галузей промисловості і сільського господарства.

Переваги кавітаційного методу перед загальноприйнятими способами знезараження вод (хлорування, озонування і т.п.) полягає в економічному та екологічному аспектах, так як при кавітаційному знезараженні виключається застосування додаткових токсичних елементів, які негативно впливають на організм людини і вимагають значних витрат на їх придбання.

Кавітаційні установки відрізняються своєю компактністю. Вони не вимагають великих площ. Можуть замінювати кілька стадій в технології очищення стічних вод (механічну, біологічну та знезараження).