

Л.І. ШЕВЧУК, І.С. АФТАНАЗІВ, О.І. СТРОГАН  
Національний університет “Львівська політехніка”, м. Львів

## ВІБРАЦІЙНИЙ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ КАВІТАТОР РЕЗОНАНСНОЇ ДІЇ

© Шевчук Л.І., Афтаназів І.С., Строган О.І., 2011

*Наведено опис вібраційного кавітатора, призначеного для ініціювання та активації хіміко-технологічних та очисних процесів, зокрема біологічного знезараження води. Кавітатор працює у неперервному режимі подавання рідини із продуктивністю понад 5,5 м<sup>3</sup>/год.*

*Two-stroke oscillation electromagnetic kavitator of resonance action consists of two electromagnets, resilient system, which connects their stators and anchors, and the causative agents of kavitejhen located in a liquid as two sounding boards with opening which hesitate in antifaza. The degree of biological disinfections of water provides high at her continuous serve with the productivity by about 3,5 м<sup>3</sup>/hours.*

**Постановка проблеми.** Загальновідома роль води у виробництві продукцій всіх галузей та в існуванні біосфери. Упродовж ХХ ст. використання прісної води збільшилося у сім разів, тоді як населення планети зросло лише вдвічі. Запаси придатної для споживання води щороку зменшуються. Незадовільний стан питної й технічної води нині являє собою неабияку екологічну проблему і загрозу для людства. Зрозуміло, що істотно зменшити побутове та промислове забруднення води, як і промислові викиди в атмосферу, на цьому етапі суспільного розвитку людства нереально, тому особливої актуальності набувають дослідження, спрямовані на вдосконалення наявних та розроблення новітніх технологій захисту і збереження довкілля, зокрема на вдосконалення технологій водопідготовки та водоочищення, на розробку обладнання для їх реалізації.

**Аналіз останніх досліджень.** Для знезараження води на промислових підприємствах використовують різноманітні фізичні, хімічні та комплексні методи: ультрафіолетове випромінювання, струми високої частоти, ультразвукову та гідродинамічну кавітацію, кип'ятіння, хлорування, озонування, використання іонів срібла та інше. З-поміж різноманітних методів фізичних впливів на процеси водопідготовки та водоочищення широко застосовуються методи кавітаційної обробки води, в основу яких покладено ультразвукове та гідродинамічне збурення кавітації в рідинах.

Основою їх використання в хіміко-технологічних процесах стали дані теоретико-експериментальних досліджень явища збурення кавітації у рідинах за допомогою дії ультразвуку із певною частотою, наприклад 22 кГц або 44 кГц. Суть ультразвукового методу полягає у застосуванні коливань ультразвукової частоти для створення умов росту ядер кавітації, якими є завжди наявні в рідині різноманітні газові включення [1]. Збіг частоти власних коливань ядер кавітації із частотою ультразвуку збуджує явище резонансу, яке супроводжується миттєвим розширенням з подальшим сплескуванням кавітаційних бульбашок. Під час сплескування кавітаційних бульбашок відбувається трансформація накопиченої потенціальної енергії рідини, що оточує бульбашку, в кінетичну. Цей процес завершується в момент руйнування бульбашки, а корисна потужність виділяється у вигляді імпульсу. Навколо кожної сплеснутої кавітаційної бульбашки генерується сферична ударна хвиля, а кожна сплеснута бульбашка стає джерелом трьохчотирьох чергових зародків кавітаційних каверн, тобто процес набуває лавиноподібного характеру.

Додаючись щомиттєво, ударні хвилі сусідніх сплеснутих кавітаційних бульбашок формують у невеликому об'ємі доволі потужне енергетичне поле. Наслідок – забезпечення суттєвої інтенсифікації окисних реакцій і, відповідно, пов'язаних з цим очисних процесів, зокрема водоочищення та знезараження води від біологічних забруднень.

Однак проходження ультразвуку крізь рідину супроводжується значними втратами енергії акустичних хвиль, зумовленими розсіюванням ультразвуку на неоднорідностях багатозафазного 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 (5–10 Вт/см<sup>2</sup>), що практично унеможливує нині промислове використання ультразвукової кавітації, обмежуючи сферу її застосування лабораторними дослідженнями.

Перевага методів гідродинамічного збурення кавітації у високій продуктивності, простоті реалізації. Як правило, збурення гідродинамічних кавітаційних явищ у рідинах реалізують в результаті механічних рухів у них твердих тіл за певних швидкостей їхніх відносних переміщень відносно рідини. Це і методи збурення кавітації вібраційними в рідині пластинами, і обертовими в рідині лопатями із виступами-збурювачами тощо.

Пояснення механізму впливу гідродинамічного кавітаційного поля на технологічні середовища ґрунтується на кумулятивній гіпотезі, згідно з якою на завершальній стадії сплескування бульбашок виникають мікроструминки високого енергетичного потенціалу [2]. Вони впливають на поверхню розподілу фаз, тобто руйнують її границі з утворенням емульсії. Інтенсифікувальна дія гідродинамічної кавітації пояснюється виникненням низки ефектів, а саме: пульсуючим тиском (близько  $10^3$ – $10^4$  атмосфер) і хвилями розрідження-стискання під час пульсації парогазових бульбашок; утворенням кумулятивних струминок; фазовими переходами, що відбуваються на поверхні бульбашок; пульсацією температури; утворенням турбулентних зон; хімічними перетвореннями. 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. Практично виникає можливість технологічно цілеспрямовано використовувати кавітаційну дію у виробничих процесах.

Однак наявність у гідродинамічних пристроях обертових лопатей, їхніх приводів рухів та перетворювальних механізмів не тільки зумовлює значну енергозатратність гідродинамічного способу збурення кавітації, а й істотно понижує 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 тільки певних частот і швидкостей відносних механічних переміщень збурювачів – обертових лопатей. Відповідно, цим зумовлені й обмеження у регулюванні кінцевої якості готового продукту.

Окрім того, спільним недоліком для ультразвукової та гідродинамічної кавітаційних обробок є нерівномірність обробки рідин, оскільки у першому випадку інтенсивність кавітаційної зони максимальна поблизу магнітостриктора і знижується з віддаленням від нього, а в другому, навпаки, інтенсивність кавітаційної зони максимальна поблизу периферії обертової лопаті і мінімальна в центрі поперечного перерізу робочої камери.

Тому актуальними залишаються дослідження, спрямовані на вдосконалення наявних та створення нових, досконаліших із позицій забезпечення високої якості та придатності для промислового застосування методів та обладнання для кавітаційного водоочищення.

Певною мірою цим вимогам відповідає створений в Львівській політехніці вібраційний електромагнітний кавітатор резонансної дії.

*Мета дослідження* – створення нового ефективного вібраційного обладнання для збурення кавітації в рідинах, дослідження особливостей його застосування для водоочищення та

зnezараження біологічного забруднення, розроблення конструктивних та технологічних схем його промислового використання.

*Об'єктом дослідження* були технологічні схеми та операції водопідготовки та водоочищення, механізми впливу кавітаційних явищ та різноманітних газів на патогенну флору в газорідних розчинах.

*Предметом дослідження* – промислове та дослідне обладнання для збурення кавітації в рідинах, гідродинаміка в умовах кавітаційного перемішування, кінетичні закономірності енергетичного впливу на зnezараження мікроорганізмів в умовах кавітації.

*Методики дослідження* – мікробіологічні методи визначення концентрації мікроорганізмів у водних розчинах, рН-метрія для визначення рН води та водних розчинів, швидкісне відеознімання для дослідження динаміки резонансної пружної підвіски, елементів привода та збурювачів кавітації вібраційного кавітатора.

Зазначимо, що спроби застосування вібрацій для збурення в рідинах кавітаційних процесів робили і раніше. Так, у [3] наведено опис гідродинамічних кавітаторів, в яких завдяки пульсаціям пружних мембран, ініційованих пульсуючим стиснутим повітрям, інтенсифікується збурення кавітації. Тут наведений опис вібраційного пневматичного кавітатора, у якому коливних рухів еластичному збурювачу кавітації надають пневмоджерелом із золотниковим пристроєм і встановленою між пластинами-кавітаторами пружною оболонкою. Однак вібрації у цих пристроях використовують лише як допоміжні активатори утворення каверн, а не як джерела їх збурення, що до істотного покращення гідродинамічного методу збурення кавітації не привело.

**Виклад основного матеріалу.** Вібраційний електромагнітний кавітатор резонансної дії для збурення кавітації у рідинах належить до обладнання кавітаційних хіміко-технологічних процесів. Він може бути застосований, наприклад, для водоочищення, зnezараження питної води, стоків хімічних, харчових та переробних підприємств від різноманітних забруднень, зокрема і біологічних. Цей кавітатор належить до групи обладнання фізико-хімічних методів кавітаційного ініціювання та активації окиснювально-відновлювальних реакцій у рідинах енергією сплескування великої кількості самозароджуваних у рідині кавітаційних бульбашок.

Принципова схема вібраційного електромагнітного кавітатора резонансної дії зображена на рис. 1, на рис. 2 – відображено фрагмент деки-збурювача кавітації із насадками-форсунками при перетіканні крізь неї рідини та утворенні кавітаційних каверн. До його складу входять завантажувальна 6, робоча 9 та відвідна 14 камери, що з'єднані із можливістю відносних переміщень через гнучкі гофри 8 та 12. На робочій камері закріплено набраний із листового заліза кільцевий якір 10, а камера та якір через циліндричні пружні стержні 5 з'єднані із закріпленими на трубах завантажувальної та відвідної камер реактивних масах 11. Співвісно якореві 10 через циліндричні пружні стержні 2 до реактивних масах прикріплено корпус 4 статора, у якому рівномірно по колу розташовано котушки електромагнітів 15 із обмотками 3. Обмотки шістьох рівномірно розміщених по колу електромагнітів з'єднано так, що вони утворюють три зміщені між собою на  $120^{\circ}$  двотактні віброзбудники. Співвісно розташовані статор із котушками і обмотками та якір з робочою камерою утворюють кільцевий електромагнітний віброзбудник, який у поєднанні із прикріпленими до реактивної маси пружними стержнями формують тримасну резонансну коливну систему. Перша з коливних мас – робоча камера із прикріпленим до неї якорем, друга – статор із котушками та обмотками, третя – реактивна маса із масивними трубами завантажувальної та відвідної камер.

До якоря та статора жорстко прикріплені деки-збурювачі кавітації 7 та 13 із рівномірно розташованими на всій їх площі отворами для перетікання оброблюваної рідини. Пари прикріплених до якоря та статора дек розміщені симетрично на вході та виході робочої камери.

Для інтенсифікації збурення кавітаційних каверн під час перетікання крізь деки оброблюваної рідини на отвори дек запресовано насадки-форсунки 16 із циліндричною зовнішньою  $\alpha$  та сферичною внутрішньою  $\beta$  поверхнями (рис. 2). Діаметр циліндричної поверхні  $D_{\alpha} = 2A$  та радіус сферичної внутрішньої поверхні  $R = 2A$  дорівнюють розмаху, тобто подвійному значенню амплітуди  $A$  коливань деки. У перетині із торцевою площиною  $\gamma$  насадки-форсунки 16 внутрішня сферична поверхня  $\beta$  утворює отвір для перетікання рідини, діаметр якого  $D_{\beta} = A$ . Цим отвором насадку 16 повернуто у бік, протилежний до напрямку потоку оброблюваної рідини (рис. 2). Віддаль між сусідніми отворами в деках дорівнює подвійному значенню розмаху коливань, тобто  $l=4A$ .

Від потрапляння сторонніх предметів до коливних систем електромагнітний вібробудник захищено захисним кожухом 1.

Розглянемо роботу вібраційного електромагнітного пристрою для збурення кавітації у рідині. По трубі завантажувальної камери 6 в робочу камеру 9 під незначним тиском або самотоком подають оброблювану рідину. Одночасно на обмотки 3 котушок 15 електромагнітів послідовно за або проти годинникової стрілки подають напругу. Електромагніти у цій самій послідовності почергово притягують до себе якір із наповненою оброблюваною рідиною робочою камерою, прогинаючи назустріч одні одним пружні циліндричні стержні 2 та 5. Прогин та пружність циліндричних стержнів 2 та 5 розраховано так, що вони унеможливають співвдарення якоря та статора. Почергове протягування якоря до поряд розташованих котушок статора трансформується у напрямлені кругові протифазні коливання двох пружно встановлених коливних мас, а саме якоря із робочою камерою та статора.

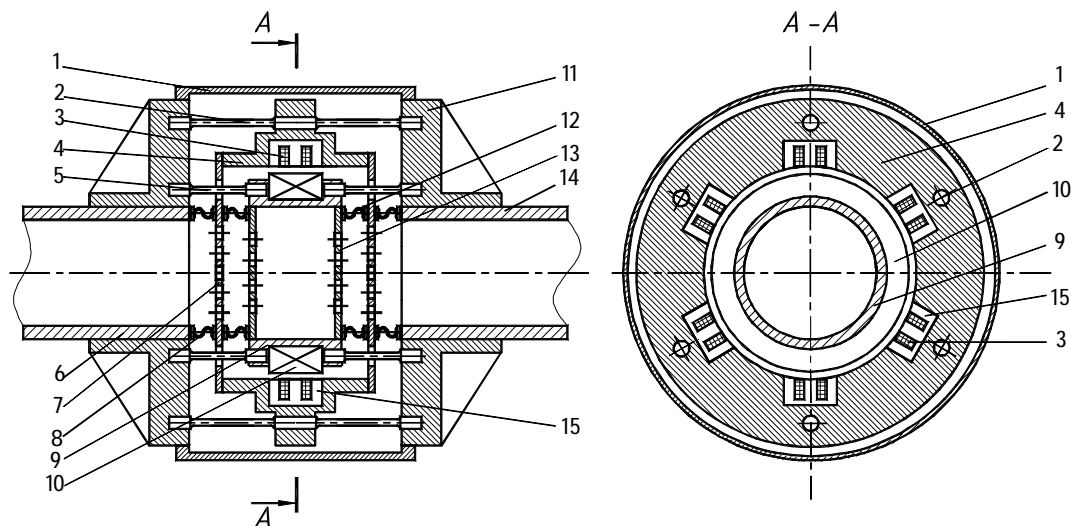


Рис. 1. Принципова схема вібраційного електромагнітного кавітатора резонансної дії

Ці коливання відбуваються із певними розрахунковими амплітудами та частотою, яка дорівнює частоті подавання напруги на котушки кільцевого електромагнітного вібробудника, як правило, 50 Гц.

Разом із коливними масами плоскопаралельні кругові протифазні переміщення в робочій камері здійснюють і прикріплені до них деки 7 і 13 з отворами, пересікаючи потік оброблюваної рідини, що неперервно надходить в цю камеру. За рекомендованої амплітуди коливань дек 1,5–2 мм і частоті 50 Гц швидкість, з якою дека перетинає потік рідини, становить 4,7–6,3 м/с, швидкість відносних переміщень двох сусідніх дек, що коливаються у протифазі, вдвічі більша, тобто 9,4 – 12,6 м/с. Цього достатньо для збурення загостреними кромками отворів у деках із наявних у рідині зародків кавітації повітряних кавітаційних каверн. Під час переміщення повітряних каверн уздовж сферичної внутрішньої поверхні насадок-форсунок тиск всередині каверн стрімко наростає,

збільшуючи їхній об'єм, внаслідок чого на виході із насадки каверна створює в оброблюваній рідині імпульси ударних хвиль. Дія імпульсів ударних хвиль на завжди наявні в рідині ядра кавітації супроводжується миттєвим зародженням, розширенням та подальшим сплескуванням кавітаційних бульбашок. Рівномірним розташуванням отворів у деках забезпечується рівномірність інтенсивності кавітаційного поля по всій площі поперечного перерізу робочої камери, тобто рівномірність обробки рідини.

Завдяки симетричному розташуванню дек-збурювачів кавітації рідина, що протікає через робочу камеру 9, двічі зазнає кавітаційної обробки. Після проходження у робочій камері подвійної кавітаційної обробки рідина через відвідну камеру 14 відводиться для подальшого цільового використання.

Регулюють якість оброблених у вібраційному електромагнітному кавітаторі резонансної дії рідин, регулюючи інтенсивність формованого ним в рідині кавітаційного поля, що залежить від амплітуди  $A$  коливань дек-збурювачів кавітації та діаметра отворів  $D_0$  для перетікання рідини. Амплітуду коливань дек регулюють зміною величини струму живлення котушок електромагнітів.

Розрахунок пружності коливних систем, потужності електромагнітів привода та їхніх конструктивних елементів (форму та розміри електромагнітів, поперечний переріз та кількість витків обмоток тощо) здійснюють за загальноприйнятими методиками розрахунків вібраційних машин із електромагнітним приводом [4].

Лабораторні дослідження технологічних можливостей запропонованого вібраційного електромагнітного пристрою для збурення кавітації в рідині здійснювали на технологічних операціях очищення води від біологічних забруднень.

Завдяки його використанню для знезараження води від бактерій різновиду *Pseudomona* у середовищі вуглекислого газу  $CO_2$  за неперервного подавання води у робочу камеру в обсязі 1,5–2 л/с забезпечувався ступінь очищення води 75–80 %.

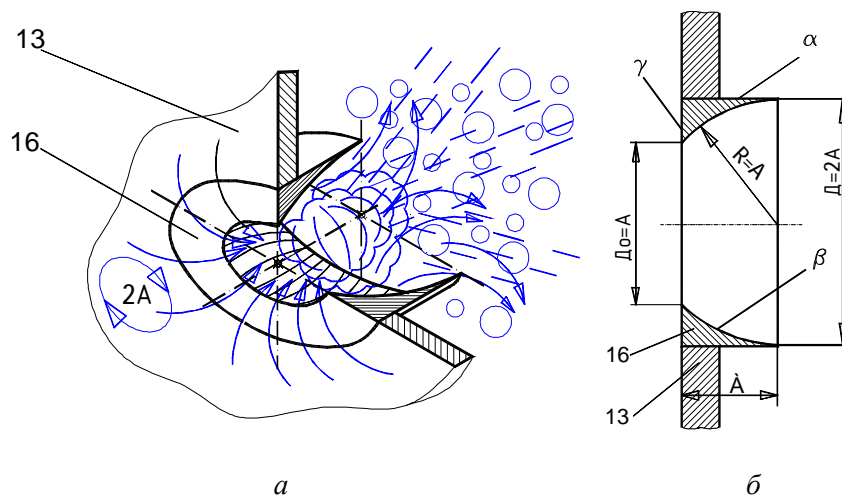


Рис. 2. Схема формування кавітаційного поля

За аналогічного подавання води, забрудненої дріжджами виду *Saccharomyces* у середовищі озону  $O_3$ , ступінь очищення води сягає 90 %. Продуктивність технологічного процесу водоочищення при цьому становила 5,5–7 м<sup>3</sup>/год.

Основною перевагою вібраційного електромагнітного пристрою для збурення кавітації в рідині порівняно із відомими є висока продуктивність, придатність для обробки значних обсягів рідин у неперервному їх потоці у поєднанні із забезпеченням рівномірності обробки рідин.

**Висновки.** Вібраційний електромагнітний кавітатор резонансної дії для збурення кавітації в рідинах має істотні переваги над традиційними гідродинамічними кавітаційними пристроями, основними з яких є висока продуктивність, придатність для оброблення значних обсягів рідин в неперервному їх потоці у поєднанні із забезпеченням рівномірності обробки рідин.

Порівняно з проточними ультразвуковими апаратами та гідродинамічними кавітаторами енергозатрати на обробку рідини зумовлені лише в'язкістю оброблюваної рідини та її опором плоскопаралельним переміщенням коливних дек, що значно менший за гідродинамічний опір кавітаторів при обтіканні їхніх обертових елементів.

Вібраційні електромагнітні кавітатори резонансної дії є перспективним обладнанням для водопідготовки, які дають змогу одночасно знезаражувати воду й окиснювати забруднення. Особливістю магнітно-кавітаційного впливу на біологічне забруднення води є одночасна дія низки фізико-механічних чинників: ударні хвилі, кумуляція, автоколивання, випрямлена дифузія і вібротурбуляція. Крім того, внаслідок сплескування кавітаційних бульбашок тут утворюються активні хімічні речовини: гідроксильні радикали, озон, пероксид водню тощо. За суттю, ця технологія є комбінованим способом впливу на воду. Можна передбачити, що сукупність фізичних і хімічних факторів гідродинамічної віброкавітації створить найсприятливіші умови для активної інактивації шкідливих мікроорганізмів у воді.

1. Маргулис М.А. *Основы звукохимии (химические реакции в акустических полях)*. – М.: Высш. шк., 1984. – 272 с. 2. Вітенько Т.М. *Гідродинамічна кавітація у масообмінних, хімічних і біологічних процесах: моногр.* / Т.М. Вітенько. – Тернопіль: в-во ТДТУ ім. І. Пулюя, 2009. – 224 с. 3. Вітенько Т.М. *Механізм та кінетичні закономірності інтенсифікуючої дії гідродинамічної кавітації у хіміко-технологічних процесах: дис. на здоб. наук. ступ. док. техн. наук*, – Львів, 2010. 4. Ланець О.С. *Високоєфективні міжрезонансні вібраційні машини з електромагнітним приводом (Теоретичні основи та практика створення): моногр.* – Львів: Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2008. – 324 с.