

3. ТЕХНОЛОГІЯ ТА УСТАТКУВАННЯ

ISSN 1994-7836 (print)
ISSN 2519-2477 (online)

УДК 534.29:66.084

Article info
Received 29.03.2017 р.

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

НУ "Львівська політехніка", м. Львів, Україна

РЕЗОНАНСНИЙ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ ВІБРОКАВІТАТОР

Резонансний електромагнітний віброкавітатор призначений для кавітаційного оброблення рідин на основі води. Ці кавітатори ефективні у використанні для очищення води басейнів аквапарків від біологічних забруднень, для покращення структури питної води. Резонансні електромагнітні віброкавітатори автори створили вперше, їх конструктивна будова захищена патентом на винахід. Конструкція цього вібраційного кавітатора доволі універсальна, що створює передумови для успішного використання її як для трубопроводів незначних перерізів у діапазоні від одного до трьох дюймів, так і для промислових труб водогонів діаметром до 250-300 мм. Особливо ефективним, на нашу думку, вібраційний кавітатор мав би виявитись для біологічного знезараження питної води. Простота його конструкції та обслуговування створюють передумови для вмонтовування кавітатора у трубопроводи перепомпування води в басейнах, аквапарках та водоймах громадського використання, де поряд із знезараженням води здійснюватиметься і її очищення. Внаслідок сплескування кавітаційних бульбашок тут утворюються активні хімічні речовини: гідроксильні радикали, озон, пероксид водню тощо. По суті, ця технологія є комбінованим способом очищувального впливу на воду. Основними вузлами цих кавітаторів є статор із електромагнітами, коливний якір із збурювачами кавітації та резонансна пружна система, що з'єднує якір із статором. Продуктивність кавітаційного оброблення води басейнів – 1,5-2,0 м³/год, ступінь очищення стоків молокопереробних підприємств – 97-98 % за продуктивності до 100 л/год. Продуктивність очищення стоків пивоваріння від дріжджів становить 200-250 дм³/год.

Ключові слова: кавітація; електромагнітний привід; якір; статор; пружна система; резонанс; очищення; знезараження; стоки; бактерії; забруднення; коливання.

Вступ. На сьогодні для кавітаційного оброблення рідин і суспензій на їх основі здебільшого використовують ультразвукові генератори та гідродинамічні кавітатори. Ультразвукове кавітаційне оброблення відрізняється високою інтенсивністю формованого кавітаційного поля, проте вона надзвичайно низькопродуктивна через швидке згасання ультразвукової хвилі в рідинному середовищі. Та й енергетичні витрати в ультразвукових генераторах вельми відчутні – до 500 Вт/дм³, що здебільшого обмежує використання ультразвуку сферою лабораторних досліджень.

Особливо перспективними для покращення екології навколишнього середовища виявились дослідження вчених "Львівської політехніки", які переконливо довели можливість ефективного використання кавітації для знезараження стоків переробних виробництв від органічних і біологічних забруднювачів. Ці дослідження відкривають перспективу якісного кавітаційного очищення стоків молокопереробних підприємств, виробництв пива, напоїв і спирту, а також і водойм громадського користування (басейнів, аквапарків і т. ін.). Згубний вплив цих переробних виробництв на екологію навколишнього середовища особливо відчутно не тільки через відсутність якісних і дешевих технологій очищення їх стоків, але і через значне поширення цих виробництв практично в кожному населеному пункті. Відповідно і внесок цих підприємств у забруднення водних ресурсів досить відчутний. Адже здебільшого стоки цих виробництв без належного очищення скида-

ють в довколишні водоймища.

Мета цього дослідження – розробити вібраційні кавітатори резонансної дії, здатні забезпечити поєднання високої продуктивності та якості кавітаційного впливу на рідину.

Основні завдання дослідження:

- аналіз і перспективи використання низькочастотних вібрацій для збудження в рідинах кавітаційних полів;
- експериментальне дослідження умов зародження і стабільного існування кавітаційного поля в умовах низькочастотних вібрацій;
- розроблення методик розрахунку і проектування віброкавітаторів резонансної дії;
- експериментальне визначення основних технологічних параметрів віброкавітаційного оброблення;
- перевірка технологічних можливостей і придатності віброкавітаційного оброблення для очищення стоків переробних підприємств, вод водойм громадського користування (басейнів і аквапарків), природної води.

Виклад основного матеріалу. Основною перевагою низькочастотних віброкавітаторів, які вперше ми встановили, є зниження на 20÷25 % енерговитрат на збудження і забезпечення стабільності, що формуються в рідинах кавітаційних полів. Досягається це підведенням до резонансу присутніх в оброблюваній рідині зародків кавітації, в ролі яких здебільшого виступають мікропухирці розчинених у рідині повітря і газів, різноманітні зважені в рідині включення і мікрочастинки.

Однак, як показали результати наших досліджень, і

Цитування за ДСТУ: Афтаназів І. С. Резонансний електромагнітний віброкавітатор / І. С. Афтаназів, Л. І. Шевчук, О. І. Строган // Науковий вісник НЛТУ України. – 2017. – Вип. 27(3). – С. 124–130

Citation APA: Aftanaziv, I. S., Shevchuk, L. I., & Strogan, O. I. (2017). Electromagnetic Resonance Vibrocavator. *Scientific Bulletin of UNFU*, 27(3), С. 124–130. Retrieved from: <http://nv.nltu.edu.ua/index.php/journal/article/view/362>

тут є певні резерви стрімкого підвищення інтенсивності гідродинамічного кавітаційного оброблення. Виявилося, що резонансу зародків кавітації можна досягти і за частот зовнішнього силового впливу не тільки рівних частотам коливань зародків кавітації, але і за частот, які кратні резонансним. У механіці це явище досить поширене і використовується в технологічних цілях. Наприклад, у вібраційно-відцентрових машинах для зміцнювального оброблення деталей, у планетарних віброробувачах і інших подібних їм пристроях. Механізм цього явища досить простий по своїй суті і найбільш наочно можна проілюструвати на прикладі дитячих гойдалок – немає потреби для збільшення амплітуди коливань гойдалки, підштовхують її в кожному з періодів коливань. Достатньо з певною частотою, але головне регулярно, прикладати до гойдалки, що коливається, силовий вплив, напрямком і вектор якого збігаються з напрямком коливань гойдалки. При цьому, залежно від частоти і величини зовнішнього силового впливу, амплітуда коливань гойдалки може як зменшуватися, так і стрімко збільшуватися. У практиці вібраційної техніки ці частоти силового впливу на гармонійно коливні тіла, що сприяють підведенню до резо-

нансу коливальну систему, називають діапазонами частот кратності резонансу і відрізнятися від резонансних частот вони можуть у сотні і тисячі разів. Але головне неухильне дотримання двох основних вимог до них – стабільність у часі і збіг у напрямку переміщень коливного об'єкта.

Виявилося, що принципи і закономірності частот кратності поширюються і на гідравлічні об'єкти, зокрема і на зважені в рідинному середовищі предмети – бульбашки газів і повітря, механічні включення та їм подібні утворення – по суті на зародки кавітації! Експериментальне підтвердження цього явища і стало ключовим етапом на шляху створення принципово нового класу кавітаційного обладнання, який названо низько-частотними вібраційними кавітаторами резонансної дії.

Принципову схему кільцевого електромагнітного вібраційного кавітатора (КЕВК) резонансної дії (Starchevskiy et al., 2014; Shevchuk, Aftanaziv & Strohan, 2011) наведено на рис. 1, фрагмент деки-збурювача кавітації з насадками-форсунками під час перетікання крізь неї рідини, що супроводжується утворенням кавітаційних каверн, відтворено на рис. 2.

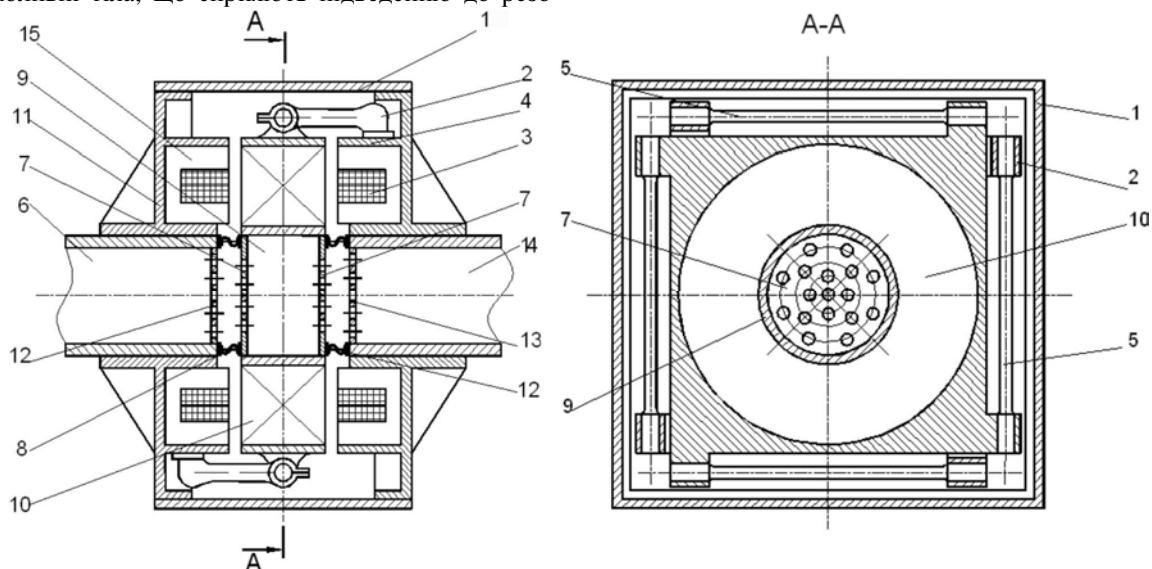


Рис. 1. Принципова схема кільцевого вібраційного електромагнітного кавітатора (КЕВК) резонансної дії

До його складу входять завантажувальна 6, робоча 9 та відвідна 14 камери. Робоча камера 9 з'єднана із завантажувальною 6 та відвідною 14 із можливістю відносних переміщень через гнучкі гофри 8 та 12. На робочій камері 9 закріплено набраний із листового заліза кільцевий ярмір 10, а камера та ярмір через кронштейни 2 та циліндричні пружні стержні 5 з'єднані із закріпленими на трубах завантажувальної 6 та відвідної 14 камер реактивних масах 11. Співвісно ярміреві 10 до кожної із закріплених на завантажувальній 6 та відвідній 14 камерах реактивних масах 11 прикріплено корпус 4 електромагніту. У корпусі 4 співвісно ярміреві 10 розташовані кільцеві статор 15 із котушкою обмотки 3. Кожен із статорів 15 із котушкою обмотки 3 та спільним ярміром 10 (фіг. 1) формують два симетрично розміщених відносно ярміра 10 електромагніти. Обмотки електромагнітів під'єднані до мережі змінної напруги живлення із зміщенням по фазі таким чином, що у першому півперіоді синусоїдальної змінної напруги ярмір притя-

гується до одного із крайніх електромагнітів, а в іншому півперіоді – до іншого електромагніту.

Співвісно розташовані статор 15 із котушкою обмоток 3 та ярмір 10 з робочою камерою 9 утворюють кільцевий електромагнітний віброробувач із двома електромагнітами та спільним ярміром. Електромагнітний віброробувач у поєднанні із прикріпленими до реактивної маси пружними стержнями 5 формують двомасову резонансну коливну систему. Перша з коливних мас – наповнена оброблюваною рідиною робоча камера 9 із прикріпленням до неї ярміром 10 та деками 7, друга – статор 15 із обмотками 3, реактивні маси 11 із масивними трубами завантажувальної 6 та відвідної 14 камер.

До ярміра та статора жорстко прикріплені дека 7 та збурювачі кавітації 13 із рівномірно розташованими по всій їх площі отворами для протікання оброблюваної рідини. Діаметри отворів у деках 7 та 13 дорівнюють амплітуді коливання робочої камери, а відстань між сусідніми отворами – потрійному значенню амплітуди.

Пари прикріплених до якоря та статора дек розміщені симетрично на вході та виході робочої камери 9.

Від потрапляння сторонніх предметів до коливних систем електромагнітній віброзбудувач захищено захисних кожухом 1.

Для інтенсифікації збурення кавітаційних каверн під час перетікання крізь деки 7 і 13 оброблюваної рідини на отвори дек запресовані насадки-форсунки 16 з циліндричною зовнішньою α і сферичною внутрішньою β поверхнями (див. рис. 2). Діаметр циліндричної поверхні $D_{\text{ц}} = 2A$ і радіус сферичної внутрішньої поверхні $R = 2A$ дорівнюють розмаху, тобто подвійному значенню амплітуди A коливної деки. У перетині з торцевою пло-

щиною γ насадки-форсунки 16 внутрішня сферична поверхня β утворює отвір для перетікання рідини, діаметр якого рівний $D_0 = A$. Цим отвором насадка 16 обернена в сторону, протилежну напрямку потоку оброблюваної рідини (див. рис. 2). Відстань між сусідніми отворами в деках дорівнює подвійному значенню розмаху коливань, тобто $l = 4A$.

Робота вібраційного електромагнітного кавітатора здійснюється таким чином. По трубі завантажувальної камери 6 в робочу камеру 9 під незначним тиском або самострумом подають оброблювану рідину. Одночасно на обмотки 3 котушок електромагнітів із вище відзначеним зміщенням по фазі подають напругу.

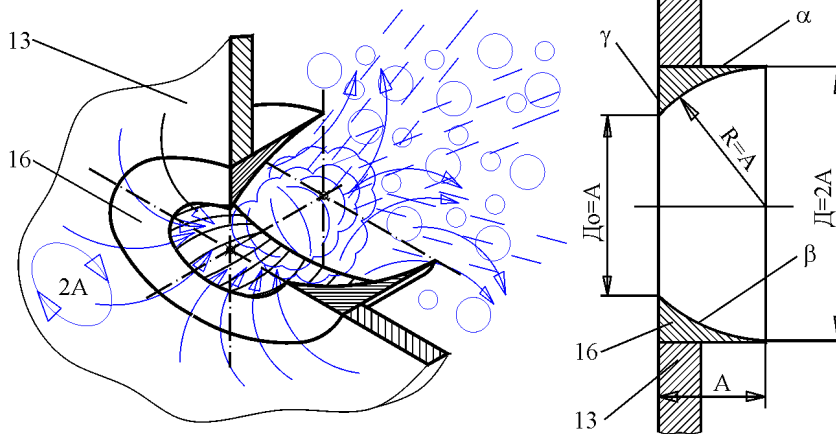


Рис. 2. Фрагмент деки-збудувача кавітації з насадками-форсунками під час перетікання крізь неї рідини і утворення кавітаційних каверн (нумерація позицій відповідно до рис. 1)

Електромагніти по чергово притягують до себе якір 10 із наповненою оброблюваною рідиною робочою камерою 9, прогинаючи при цьому пружні циліндричні стержні 5. Прогин та пружність циліндричних стержнів 5 розраховано таким чином, що вони забезпечують резонансні коливні режими робочої камери 9 та унеможливають співударання якоря 10 та статорів 15 між собою (фіг. 1). Почергове протягування якоря 10 до електромагнітів 15 трансформується у направлені плоскопаралельні коливні переміщення наповненої оброблюваною рідиною робочої камери 9. Ці коливання відбуваються із певними розрахунковими амплітудами та частотою, що дорівнює подвоєній частоті подачі напруги на котушки кільцевих електромагнітних віброзбудувачів. Так, за частоти змінної напруги мережі живлення обмоток 3 електромагнітів 50 Гц частота коливань робочої камери 9 буде дорівнювати 100 Гц. Разом із коливною робочою камерою 9 плоскопаралельні переміщення здійснюють і прикріплені до камери деки 7 із отворами, пересікаючи потік оброблюваної рідини, що неперервно надходить до цієї камери. В міру наближення коливних дек 7 до нерухомих дек 14 тиск рідини між деками наростає, що сприяє проштовхуванню оброблюваної рідини крізь отвори у нерухомих деках 14 із швидкістю, що дорівнює швидкості переміщень дек 7.

За рекомендованої амплітуди коливань дек 1,5-2,0 мм і частоти 100 Гц швидкість, з якою дека перетинає потік рідини, становить 0,95-1,15 м/с. Співвісним розташуванням коливних та нерухомих дек, що здійснюють коливні рухи назустріч одна одній, забезпечується підвищення тиску та швидкості гідравлічних потоків оброблюваної рідини під час її протікання крізь

отвори, які влаштовані у деках-збудувачах кавітації. Унаслідок цього струмені рідини втрачають щільність та міцність, а із завжди наявних у рідині зародків кавітації лавиноподібно зароджуються, збільшуються у своєму об'ємі та сплескують кавітаційні бульбашки, які і формують кавітаційне поле високої інтенсивності. Рівномірним розташуванням отворів у деках 7 та 14 забезпечується рівномірність інтенсивності кавітаційного поля по всій площі поперечного перерізу робочої камери 9, тобто рівномірність оброблення рідини.

Цієї швидкості рідинного струменя досить для утворення із присутніх в оброблюваній рідині і розчинених в ній повітря і газів повітряних кавітаційних каверн. Під час переміщення повітряних каверн вздовж сферичної внутрішньої поверхні насадок-форсунок 16 тиск всередині каверн стрімко наростає, збільшуючи їх об'єм, внаслідок чого на виході з насадки каверна створює в оброблюваній рідині імпульси ударних хвиль. Дія імпульсів ударних хвиль на присутні в рідині зародки кавітації супроводжується миттєвим зародженням, розширенням і подальшим спаданням кавітаційних бульбашок. Рівномірним розташуванням отворів у деках забезпечується рівномірність інтенсивності кавітаційного поля по всій площі поперечного перерізу робочої камери, тобто рівномірність оброблення рідини.

Завдяки симетричному розташуванню дек-збудувачів кавітації рідина, що протікає через робочу камеру 9, двічі піддається кавітаційному обробленню. Після проходження в робочій камері подвійного кавітаційного оброблення рідина через відвідну камеру 14 відводиться для подальшого цільового використання.

Регулювання якості оброблених у вібраційному електромагнітному кавітаторі резонансної дії рідин здійснюють регулюванням інтенсивності сформованого ним у рідинах кавітаційного поля, яка залежить від амплітуди A коливань дек-порушників кавітації, частоти цих коливань і діаметра отворів D_0 для перетікання рідини. Амплітуду коливань дек регулюють зміною величини струму живлення котушок електромагнітів, зі зміною якої змінюється сила притягання якоря до електромагнітів статора, чим, власне, і зумовлена величина просторових переміщень, тобто розмах і амплітуда коливання переміщень дек-збурювачів кавітації. Частоту коливань дек регулюють за допомогою тиристорної схеми регуляції частоти подачі напруги на обмотки котушок живлення електромагнітів, зі зміною якої змінюється частота притягання якоря до електромагнітів статора, тобто частота просторових переміщень жорстко з'єднаних з якорем дек, що збурюють кавітацію. Оптимальні значення амплітуди і частоти коливань підбирають дослідним шляхом залежно від фізичних параметрів оброблюваних рідин – їх щільності, в'язкості, сил поверхневого натягу тощо. Особливу увагу при підборі технологічних параметрів вібраційного кавітаційного оброблення приділяють вибору частот коливань дек, прагнучи підібрати їх максимально близькими в кратності до власних частот коливань, присутніх у конкретній оброблюваній рідині і мікропучирців розчинених газів і повітря, що відіграють роль зародків кавітації. Цим забезпечують здійснення кавітаційного оброблення в т. зв. резонансному режимі за мінімальних енергетичних витрат.

Розрахунок пружності коливальних систем, потужності електромагнітів приводу та їх конструктивних елементів (форму і розміри електромагнітів, поперечний переріз і кількість витків обмоток тощо) здійснюють за загальноприйнятими методиками розрахунків вібраційних машин з електромагнітним приводом (Lapets, 2008).

Пристрої для віброрезонансного кавітаційного оброблення рідин передбачають дві групи змінних параметрів регулювання забезпечуваних нею показників якості кавітаційного оброблення, а саме групу конструктивних і групу технологічних параметрів.

До групи конструктивних належать:

- частота коливань дек-збурювачів кавітації, яку регулюють встановленим у пульті управління регулятором частоти, наприклад, моделі AFC – 120;
- амплітуда коливань дек-збурювачів кавітації, яку регулюють потужністю і конструктивними параметрами (проміжком між якорем і статором) електромагнітів приводу і жорсткістю пружної системи (стрижнів 2 і 5) підвіски дек;
- напрям коливань дек-збурювачів кавітації (вздовж або поперек оброблюваного рідинного потоку), що зумовлено розташуванням електромагнітів приводу.

Основним завданням зміни конструктивних параметрів тут є зміна швидкості і напрямків просторових переміщень дек-збурювачів кавітації в рідинному потоці, що в підсумку, впливає на діапазон віброрезонансного збурення кавітації.

До групи технологічних віднесено:

- тиск і швидкість оброблюваної рідини на ділянці кавітаційного оброблення, які регулюють насосом і дроселем трубопроводу, що подає оброблювану рідину на робочу ділянку;
- різновид, кількість і тиск супутнього оброблення газу або повітря, які регулюють дроселюванням трубопроводу подачі газу;
- кількість наявних в оброблювальній рідині зародків кавітації, яку регулюють кількістю поданого на ділянку оброблення газу.

Основним завданням зміни технологічних параметрів тут є вплив на енергетичний стан оброблюваної рідини, а також вплив на тривалість її оброблення.

Отже, зміною конструктивних і технологічних параметрів ефективно впливають на міцність оброблюваної рідини, її здатність до збурення і стабільного існування в ній кавітаційних явищ, впливають на інтенсивність сформованого в ній кавітаційного поля, що в підсумку і зумовлює якість кавітаційного оброблення рідин.

Особливістю вібраційних кавітаторів, як і кавітаторів будь-якого іншого типу, є потреба в забезпеченні певного енергетичного впливу на оброблюване рідинне середовище. Такого рівня енергетичного впливу, яке супроводжується збуренням у рідині кавітаційних явищ, що ініціюють ефективний перебіг специфічних фізичних процесів і хімічних реакцій на оброблюване середовище. З позицій молекулярної фізики, створення певних передумов для появи і подальшого зростання з наявних у рідині зародків кавітації кавітаційного поля, насиченого кавітаційними бульбашками, регламентується безрозмірним комплексом Рейнольдса Re , т. зв. числом Рейнольдса Re , яке пов'язує зміни характеристик потоків рідин певної щільності і в'язкості зі зміною швидкості і тиску рідини. Критичне число Рейнольдса $Re_{кр}$ можна трактувати як параметр, який зумовлює поріг зародження в рідинній субстанції кавітації. У математичному вираженні число Рейнольдса Re має вигляд (Vitenko, 2009)

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} = \frac{v \cdot L}{\nu}, \quad (1)$$

де: ρ – щільність середовища, кг/м^3 ; v – швидкість потоку рідини, м/с ; μ – динамічний коефіцієнт в'язкості середовища, $\text{Па}\cdot\text{с}$; тут $\nu = \mu / \rho$ – кінематична в'язкість, $\text{м}^2/\text{с}$; L – характерний для конкретного обладнання лінійний розмір, м .

Число Рейнольдса Re якимось відображає взаємозв'язок між характером рідинного потоку і його швидкістю. Наприклад, за числових значень у діапазоні $2000 \leq Re \leq 20000$ перетікання рідин незначних щільності і в'язкості, як правило, здійснюється в ламінарному режимі, за вищих числових значень ламінарний режим перетворюється у турбулентний. Безрозмірний комплекс Рейнольдса Re регламентує і появу кавітаційних процесів у рідинному потоці. Числові значення безрозмірних комплексів Рейнольдса Re , за яких у рідинному потоці самоформується кавітаційне поле, називають критичним числом Рейнольдса $Re_{кр}$. Його величина зумовлена такими параметрами рідини, як її щільність і в'язкість, тиском і швидкістю рідинного потоку, а також сформованим цими параметрами градієнтом міжмолекулярно-го напруженого стану в рідині.

Для рідинних субстанцій із щільністю і в'язкістю, наближеними до щільності і в'язкості води, критичне число Рейнольдса $Re_{кр}$, як правило, неістотно перевищує значення $(1,5 - 2,0) \cdot 10^5$, тобто $Re \geq (1,5 - 2,0) \cdot 10^5$ (Vitenko, 2009).

Отже, задавши рівність (1) числовими значеннями параметрів оброблюваної рідин і критичного числа Рейнольдса $Re_{кр}$, можна визначити потрібну для збурення кавітації критичну швидкість коливальних рухів виконавчих органів віброкавітаторов, тобто їх коливних дек $V_{д*}$ із залежності

$$V_{д*} = \frac{\mu \cdot Re_{кр}}{\rho \cdot L_0} = \frac{\nu \cdot Re_{кр}}{L_0}, \quad (2)$$

де L_0 – сумарний приведений розмір довжини кіл отворів коливної дека, м. У разі одночасного використання на робочій позиції кількох дек, які коливаються у протифазі, швидкість коливних рухів кожної з них V_0 може бути зменшена на загальну кількість цих дек n , тобто

$$V_{д} = \frac{V_{д*}}{n}. \quad (3)$$

Середня швидкість коливальних рухів будь-яких вібраційних тіл, зокрема і дек-збурювачів кавітації, т. зв. віброшвидкість, лімітується частотою f і амплітудою A їх коливань. Тому задавшись, наприклад, амплітудою A коливань і прирівнявши швидкості між собою $V_{к} = V_0^*$, визначають потрібну частоту коливань дек, тобто

$$f = \frac{V_{к}}{2 \cdot \pi \cdot A} = \frac{\mu \cdot Re_{кр}}{2 \cdot \pi \cdot A \cdot \rho \cdot L_0} = \frac{\nu \cdot Re_{кр}}{2 \cdot \pi \cdot A \cdot L_0} \cdot \frac{1}{c}. \quad (4)$$

Тягове зусилля F_T приводу, завдяки якому коливна дека при своєму русі долає опір з боку оброблюваної рідини, пропорційне сумарній величині тисків ΣP_c на коливну дека, сумарній величині площі ΣS_0 поверхні отворів для перетікання рідини в коливній деці і куту β нахилу коливних дек до напрямку потоку оброблюваної рідини, тобто

$$F_T = (\Sigma P_c) \cdot (\Sigma S_0) \cdot \sin \beta. \quad (5)$$

У разі традиційних одно- і двомасових резонансних вібраційних конструкцій, тягове зусилля електромагнітних віброзбурювачів, розраховують за формулою (Lanets, 2008)

$$F_T = \frac{M_{св} \cdot \omega^2 \cdot A_{ом}}{\lambda \cdot z^2}, \quad (6)$$

де $M_{св}$ – т. зв. приведена коливна маса, яка в цьому разі є сумарною коливною масою робочої камери і містить масу $m_я$ якоря електромагніту віброприводу, приведену масу $m_{упр}$ пружні коливальні системи, масу $m_ж$ оброблюваної рідини щільністю ρ в робочій камері об'ємом V , масу m_0 коливної дека з отворами для перетікання оброблюваної рідини в сумі з елементами кріплення до неї герметизаційних гофр, тобто

$$M_{св} = m_я + m_{упр} + m_p = m_я + m_{упр} + \rho \cdot V,$$

де: $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – кругова частота коливань збурювачів кавітації; f – частота коливань якоря електромагніту приводу; $A_{ом}$ – відносна амплітуда коливань коливної системи.

У виразі (6) $\lambda = \frac{1}{\sqrt{(1 - z^2)^2 + 4 \cdot \gamma^2 \cdot z^2}}$ – динамічний ко-

ефіцієнт, в якому величина показника опору γ для сталевий пружної системи без конструкційного гистерезису

$\gamma = 0,004 \dots 0,006$; для гумових пружних систем $\gamma = 0,1 \dots 0,15$; z – коефіцієнт резонансного налаштування.

Враховуючи, що спожиту енергію на здійснення будь-якого технологічного процесу, зокрема і процесу кавітаційного оброблення води, може бути визначено із залежності $E_{об} = N \cdot t$, де: N – потужність приводу, Вт, t – тривалість оброблення, год, величину питомої енергії кавітації процесу можна обчислити із залежності

$$\varepsilon = \frac{E_{сф}}{V_p} = \frac{N}{V_p} \cdot t = \frac{E_{об} - E_n}{V_p} = \frac{N \cdot t - m \cdot c (T_k - T_0) \cdot t}{V_p} = [N - m \cdot c (T_k - T_0)] \cdot \frac{t}{V_p}, \quad (7)$$

де V_p – об'єм обробленої рідини, $дм^3$.

Ту частину кінетичної енергії, яка перетворюється у теплову E_n , можна визначити експериментально, здійснюючи вимірювання температури рідини впродовж її оброблення

$$E_n = m \cdot c (T_k - T_0) \tau,$$

де: m – маса рідинного середовища, яка обробляється в пристрої, кг; c – її теплоємність, Дж/(кг·°C); T_k – температура середовища після оброблення, °C; T_0 – початкова температура, °C; τ – тривалість оброблення, с.

Коефіцієнт корисної дії η віброкавітаційного оброблення рідини при цьому дорівнює

$$\eta = \left(\frac{E_{сф}}{E_{зат}} \right) \cdot 100 = \frac{1 - E_n}{E_{зат}} = \frac{N \cdot t - m \cdot c (T_k - T_0) \cdot t}{N \cdot t} = \frac{N \cdot \chi - \frac{m \cdot c (T_k - T_0) \cdot \chi}{N \cdot \chi}}{N \cdot \chi} = \left(1 - \frac{m \cdot c (T_k - T_0)}{N} \right) \cdot 100, \% \quad (8)$$

Експериментальну перевірку технологічних можливостей віброрезонансного оброблення здійснювали на стічних водах переробної промисловості, на очищенні води басейнів громадського користування, а також води природних водойм від забруднення ціанобактеріями.

Як досліджувані зразки стічних вод переробної промисловості використовували зразки проб стоків молокопереробних підприємств і стоків пивоварної промисловості. Дезинфікувальне кавітаційне оброблення цих стоків здійснювали в режимі замкненого технологічного циклу на експериментальній віброрезонансній кавітаційній установці з об'ємом робочої камери $1,5 дм^3$ за частоти коливань збурювачів кавітації $74 \div 75$ Гц та амплітуди $1,0 \div 1,5$ мм.

Встановлено, що кавітаційне оброблення стоків молокопереробних підприємств забезпечує $97 \div 98$ % їх знезараження від переважаючих у цих стічних водах т. зв. молочних бактерій і $92 \div 93$ % очищення від органічних забруднювачів. Забезпечена при цьому продуктивність експериментальної установки знаходиться в межах $90 \div 100$ л/год. Однак на концентрацію присутньої в цих стоках молочної кислоти, що згубно впливає на кислотність води і землі при скиданні стоків молокопереробних підприємств у природне середовище, кавітаційне оброблення істотного впливу не має.

Під час кавітаційного очисного оброблення стоків пивоварного виробництва, забруднених здебільшого пивними дріжджами, у технологічну схему подачі і відведення оброблюваної рідини включали відстійники, в яких кавітаційно оброблені стічні води відстоювалися для поділу їх від залишків зруйнованих кавітацією

дріжджових бактерій. Після відстоювання і розшарування рідини і дріжджових залишків рідину фільтрують і повторно подають на кавітаційне оброблення. Експериментально встановлено, що вплив кавітаційного поля досить активно руйнує дріжджові клітини. Зумовлено це, очевидно, протяжністю дріжджових клітин, більш розвиненою, порівняно з іншими бактеріями, поверхнею, а отже, і більш інтенсивного впливу на них енергії, що виділяється в рідинне середовище зхлопуваними кавітаційними мікробульбашками. Як наслідок, продуктивність очисного оброблення тут вельми висока. Вона приблизно вдвічі перевищує продуктивність очищення стоків молокопродуктів і для досліджуваної експериментальної установки становила $200 \div 250 \text{ дм}^3/\text{год}$.

Безумовно, що для таких великотоннажних виробництв, як очищення стоків підприємств переробної промисловості, на базі нашого експериментального обладнання може бути створено потужніші віброкавітатори резонансної дії, продуктивність очисного оброблення яких в десятки, а то і сотні разів перевищуватиме продуктивність експериментального обладнання.

Не менш ефективно віброрезонансне кавітаційне оброблення і для очищення і водопідготовки води басейнів громадського користування. На сьогодні при водопідготовці басейнів замість хімічних методів очищення води на основі хлору використовують здебільшого озонування води, її очищення пероксидом водню або ж очищення гіпохлоридом натрію, що утворюється в електролізних установках різноманітних моделей. Загальним недоліком усіх перерахованих сучасних методів водопідготовки є висока вартість їх очисних реагентів. Найбільш перспективною з позицій забезпечення якості очищення води тут, безумовно, є електролізне очищення. Однак широкому її використанню перешкоджає не так дорожнеча електролізних апаратів, як значні енерговитрати під час їх експлуатації. Для прикладу, найпоширеніша для водоочищення модель електролізної установки "Сиваш" ЕГР -1000 споживає до 10 кВт/год електроенергії. І це за потреби використання як мінімум двох установок для якісної водопідготовки середнього за розмірами басейну водотоннажністю 3,5-5,0 тис. м³ води. Настільки висока енерговитратність негативно позначається на вартості послуг для споживачів водних процедур.

Ми експериментально випробували вдосконалену технологічну схему водопідготовки басейну, що поєднує електролізне і віброкавітаційне очищення води. Відповідно до цієї схеми забруднена вода перед подачею на очищення гіпохлоридом натрію, утвореного в електролізній установці "Сиваш" ЕГР-1000, попередньо піддається кавітаційному очищенню у віброрезонансних кавітаторах, сумарна потужність приводу яких не перевищує 3 кВт/год. При цьому не тільки поліпшується структура води та якість її очищення, але і на 40-45 % зменшуються енерговитрати на процес водопідготовки. Забезпечується це тим, що кавітаційне оброблення забрудненої води ефективно незаражує її від біологічних і органічних забруднювачів, зокрема і сечовини. Це дає змогу вдвічі скоротити час експлуатації енерговитратних електролізних установок.

Вельми ефективним виявилось і віброрезонансне кавітаційне оброблення води природних водойм, яка використовується для вирощування малька риби, пиття і приготування кормів у тваринництві, для поливу сільськогосподарських рослин. Пояснюється це тим, що кавітаційне оброблення води не тільки очищає її від біологічних і органічних забруднювачів, а й покращує структуру, перетворюючи її із кластерного в мономолекулярний стан, властивий джерельній воді. А загальновідомо, що в мономолекулярному стані воду краще засвоюють не тільки рослини, але і живі організми, благотворно впливаючи і на органи травлення, і на кровоносну систему.

Висновки:

1. Створено новий спосіб вібраційного низькочастотного збудження кавітаційних явищ (процесів) у рідинах на основі води та обладнання для його реалізації. Відмінною особливістю процесу вібраційного збурення кавітації є енергетичний вплив на рідинні потоки збурювачами кавітації за їх частот коливання, що кратні частотам власних коливань, зважених в оброблюваній рідині зарядків кавітації.
2. Визначено і теоретично обґрунтовано умови збурення кавітаційних процесів низькочастотними вібраціями, наведено залежності для розрахунку швидкостей просторових переміщень збурювачів кавітації в рідинному потоці, частот їх коливань, а також основних параметрів приводу віброрезонансних кавітаторів.
3. Порівнянні з ультразвуковими кавітаторами, яким здебільшого властиві точкові магнітострикційні збурювачі кавітації, віброкавітатори забезпечують рівномірний розподіл інтенсивності кавітаційного поля по всьому поперечному перерізу робочої камери, а відповідно, і рівномірність оброблення рідини.
4. Порівняно з гідродинамічними кавітаторами, віброрезонансні кавітатори забезпечують на 25-30 % підвищення інтенсивності кавітаційного поля, а відповідно, і пропорційне підвищення продуктивності кавітаційного оброблення рідин.
5. Експериментальна перевірка технологічних можливостей віброрезонансного кавітаційного оброблення підтвердила її високу ефективність для очищення стічних вод підприємств перероблення сільськогосподарської продукції, очищення води природних водойм і басейнів громадського користування.

Перелік використаних джерел

- Lanets, O. S. (2008). *Vysokoefektyvni mizhrezonansni vibratsiini mashyny z elektromahnitnym pryvodom* (Teoretychni osnovy ta praktyka stvorennia): monohrafiia. Lviv: Vyd-vo Nats. un-tu "Lvivska politekhnika", 324 p. [in Ukrainian].
- Shevchuk, L. I., Aftanaziv, I. S., & Strohan, O. I. (2011). *Vibratsiinyi elektromahnitnyi kavitor rezonansnoi dii. Avtomatyzatsiia vyrobnychkyh protsesiv u mashynobuduvanni ta prykladobuduvanni. Ukrainnyi mizhvidomchii naukovo-tekhnichniy zbirnyk*, 45, 374-379. – Lviv: Vydavnytstvo "Lvivskoi politekhniki". [in Ukrainian].
- Starchevskiy, V. L., Shevchuk, L. I., Aftanaziv, I. S., & Strohan, O. I. (2014). Patent Ukrainy № 107769. *Vibratsiinyi elektromahnitnyi kavitor / zaiavl. 29.01.2014; reiestratsiinyi nomer zaiavky u 2014 00823, opubl. 10.07.2014, Biul. № 13*. [in Ukrainian].
- Vitenko, T. M. (2009). *Hidrodynamichna kavitatsiia u masoobminnykh, khimichnykh i biolohichnykh protsesakh*: monohrafiia. Ternopil: Vyd-vo TDTU im. I. Puliiua, 224 p. [in Ukrainian].

И. С. Афтаназів, Л. И. Шевчук, О. И. Стрган

РЕЗОНАНСНЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ВИБРОКАВИТАТОР

Резонансный электромагнитный виброкавитатор предназначен для кавитационной обработки жидкостей на основе воды. Эти кавитаторы эффективны в использовании для очистки воды бассейнов аквапарков от биологических загрязнений, для улучшения структуры питьевой воды. Резонансные электромагнитные виброкавитаторы созданы авторами впервые, их конструктивное строение защищено патентом на изобретение.

Конструкция данного вибрационного кавитатора довольно универсальна, что создает предпосылки для успешного использования ее как для трубопроводов незначительных сечений в диапазоне от одного до трех дюймов, так и для промышленных труб водопроводов диаметром до 250-300 мм. Особенно эффективным, по нашему мнению, вибрационный кавитатор должен оказаться для биологического обеззараживания питьевой воды. Простота его конструкции и обслуживания создают предпосылки для вмонтирования кавитатора в трубопроводы перекачивания воды в бассейнах, аквапарках и водоемах общественного пользования, где наряду с обеззараживанием воды будет осуществляться и ее очистка. Вследствие схлопывания кавитационных пузырьков здесь образуются активные химические вещества: гидроксильные радикалы, озон, перекись водорода и др. По сути, данная технология является комбинированным способом очищающего воздействия на воду.

Основными узлами этих кавитаторов является статор с электромагнитами, колеблющийся якорь с возмутителями кавитации и резонансная упругая система, соединяющая якорь со статором. Производительность кавитационной обработки воды бассейнов – 1,5-2,0 м³/час, степень очистки стоков молокоперерабатывающих предприятий – 97-98 % при производительности до 100 л/час. Производительность очистки стоков пивоварения от дрожжей составляет 200-250 дм³/ч.

Ключевые слова: кавитация; электромагнитный привод; якорь; статор; упругая система; резонанс; очистка; обеззараживание; стоки; бактерии; загрязнения; колебания.

I. S. Aftanaziv, L. I. Shevchuk, O. I. Strogan

ELECTROMAGNETIC RESONANCE VIBROCAVITATOR

Electromagnetic resonance vibrocavitator is designed for cavitation processing water-based liquids. Such cavitators are effective when used for cleaning water pools of biological pollution, and for improving the structure of drinking water. The authors have designed electromagnetic resonance vibrocavitators for the first time, their constructive structure is protected by a patent on an invention. Electromagnetic resonance vibrocavitator action for disturbance of cavitation in liquids relates to cavitation equipment of chemical-engineering processes. It can be used for water treatment, including disinfection of drinking water, wastewater chemical, and food processing plants from a variety of contaminants, including biological. This equipment belongs to a group of physical and chemical methods. Cavitation initiates and activates the oxidation-reduction reactions in liquids splash of large amount of energy arising in fluid cavitation bubbles. The design of the vibrocavitator is quite universal, which creates prerequisites for successful use as conduits for small cross-sections ranging from one to three inches, and industrial water supply pipes with diameter up to 250-300 mm. In our opinion, vibrating cavitator would particularly be for the biological decontamination of drinking water. The simplicity of its design and service provides the stage for the installation of the cavitator in pipelines pumping water in swimming pools, water parks and public use reservoirs, along with the disinfection of water. Because of the gap cavitation bubbles form active chemicals, hydroxyl radicals, ozone, hydrogen peroxide and others. In fact, this technology is a combined method of refining exposure to water. The main units of cavitator is a stator with electromagnets oscillating breaker anchor with cavitation and resonance elastic system connecting the anchor of the stator. The performance of cavitation water treatment pools is 1.5-2.0 m³ / hr., the degree of effluent milk business ranges from 97 to 98 % with performance up to 100 l / h. Performance effluent from brewery yeast is 200-250 dm³ / h. To conclude, a new method of low-frequency vibration resonance cavitation phenomena (processes) in water-based liquids and equipment for its implementation are designed. A distinctive feature of the process of cavitation resonance is energy impact on liquid flow cavitation during their oscillation frequency.

Keywords: cavitation; electromagnetic drive; anchor; stator; resilient system; resonance; cleaning; disinfection; wastewater; bacteria; pollution; vibrations.

Інформація про авторів:

Афтаназів Іван Семенович, д-р техн. наук, професор, Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна.

Email: IvanAftanaziv@gmail.com

Шевчук Лілія Іванівна, д-р техн. наук, професор, Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна.

Email: Shev-lili@mail.ru

Стрган Оріся Іванівна, канд. техн. наук, асистент, Національний університет "Львівська політехніка", м. Львів, Україна.

Email: orestastrogan@gmail.com