

Л. І. Шевчук, І. С. Афтаназів, О. І. Строган, П. П. Волошкевич
Національний університет "Львівська політехніка"

НИЗЬКОЧАСТОТНИЙ ВІБРОКАВІТАТОР ДЛЯ КАВІТАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ ХІМІЧНО-АКТИВНИХ РІДИН, РІДИН ПІД ТИСКОМ ТА ПРИ ПІДВИЩЕНИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

© Шевчук Л. І., Афтаназів І. С., Строган О. І., Волошкевич П. П., 2014

Наведено опис конструкції низькочастотного віброкавітатора для кавітаційної обробки хімічно-активних рідин, рідин під тиском та за підвищених температур. Встановлено його основні конструктивні та технологічні параметри, регулювання якими дає змогу обирати оптимальні режими кавітаційної обробки. Для вибору діапазонів частот коливань збурювачів кавітації розроблено спеціальний прилад.

Ключові слова: вібрації, коливання, частота, резонанс, рідина, кавітація.

The description of low frequency vibrocavitator design for cavitation processing of chemically active liquids, liquids under pressure and high temperature is carried out. Its basic design and technological parameters are set up; by controlling them one can choose optimal regimes of cavitation processing. A special device for choosing range frequency fluctuation of cavitation breakers is developed.

Key words: vibrations, oscillations, frequency, resonance, liquid, cavitations.

Через надмірне забруднення довкілля, особливо впродовж останніх десятиліть, практично втрачена здатність природи до самовідновлення, зокрема і води до самоочищення. Тому тільки високий ступінь водоочищення мають забезпечувати сучасні очисні технології та реалізуюче їх обладнання.

Із когорти основних методів водопідготовки та очищення стоків, куди зараховано механічні, хімічні, фізичні та біологічні методи, найперспективнішими видаються різноманітні способи фізичного водоочищення, що зумовлено не тільки високою їх ефективністю, а і відсутністю потреби у відділенні супутніх до водоочищення продуктів. До таких водоочисних технологій належать електроіскровий метод, вакуумування, дія електричного поля через проникну перегородку з утворенням катодної води, швидке охолодження води (метод Л.А. Юткіна), обробка води магнітним полем, кавітаційна обробка тощо. Однак і фізичним методам притаманні певні недоліки, які зазвичай, проявляються у надмірно потужних енергетичних впливах на оброблювані рідини, зумовленими цими високими рівнями питомих (на одиницю об'єму середовища) енергозатрат та супутніми фінансовими витратами, а головне, незначною продуктивністю. Певною мірою цих недоліків позбавлена кавітаційна обробка рідин, яка в останні десятиліття набуває все ширшого промислового застосування.

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

Певною мірою означеним вимогам відповідає новостворений в Національному університеті "Львівська політехніка" метод віброрезонансної кавітаційної обробки рідин. Його специфічною відмінною особливістю є збурення кавітаційних процесів в оброблюваних рідинах підведенням до резонансного коливного режиму наявних у рідинах зародків кавітації. Досягають цього завдяки періодичному енергетичному впливу на них віброуючих в рідинному потоці збурювачів кавітації, зазвичай твердих тіл.

Метою цього дослідження є розробка кавітаційного устаткування для знезараження стічних вод від органічного та біологічного забруднення, оптимізація його основних конструктивних та технологічних параметрів,

У задачі дослідження входило:

- розробка конструкції віброкавітатора, придатного для високопродуктивної обробки хімічно-активних рідин та рідин за підвищених температур;
- визначення основних конструктивних та технологічних параметрів віброкавітаторів резонансної дії, що впливають на продуктивність очисного процесу та якість обробки рідин.

Об'єктом та предметом дослідження були технологічні схеми та операції водопідготовки та водоочищення, промислове та дослідне обладнання для збурення кавітації в рідинах, гідродинаміка в умовах кавітаційного перемішування, кінетичні закономірності енергетичного впливу на знезараження води в умовах кавітації.

Аналіз попередніх досліджень. Згідно з наявною у авторів цієї роботи інформацією, на теренах України сьогодні над питаннями створення нових конструкцій вібраційних кавітаторів, розробок технологічних процесів їх використання найактивніше працюють науковці двох науково-дослідних шкіл, а саме Хмельницького національного університету “Поділля” та Львівської політехніки. Конструкції віброкавітаторів, які запропонували професори Нац. ун-ту “Поділля” Р.І. Сілін та А.І. Гордєєв, ґрунтуються на віброприводах дебалансного, ексцентрикового чи електромагнітного типів і забезпечують дискретну обробку рідин [1]. Певним обмеженням у застосуванні цих пристроїв є незначна продуктивність, зумовлена тим, що всю оброблювану воду необхідно пропompувати крізь невеликі отвори-збурювачі кавітації. Практично це унеможливує обробку протічної води у неперервному потоці, зводячи її до порційного дискретного, а отже, і малопродуктивного очищення.

Конструкції розробників Львівської політехніки зорієнтовані на обробку рідин у неперервному їх потоці, що спроможне забезпечувати доволі високі (до 2,0 м³/год.) показники продуктивності. Однак через наявність гумових гофр, які герметизують робочі ділянки кавітаторів, ці конструкції не придатні для обробки рідин під тиском, за підвищених температур тощо [2, 3].

Цих недоліків позбавлена конструкція кавітатора резонансної дії, яку створили автори [4], її принципова схема відображена на рис.1, а світлина – на рис.2. Ці конструкції низькочастотних вібраційних кавітаторів, спроможні забезпечувати обробку при підвищених до 3,5-4,0 кг/см² тисках рідин та їх високих (до 100 °С) температурах. Виготовляють їх із нержавіючої сталі, а характерною відмінністю від традиційних віброкавітаторів є відсутність еластичних гофр та резонансної пружної підвіски коливних дек-збурювачів кавітації. Зрозуміло, що забезпечити конструктивне регулювання на резонансні режими роботи кавітаторів тут доволі складно, тому під час проектування їх розраховують на конкретні наперед задані режими роботи. Підвищення коефіцієнта корисної дії у цих кавітаторах досягають завдяки експериментальному підбору частот коливних дек-збурювачів кавітації, наближеним до кратних резонансу частот коливних зародків кавітації. Це здійснюють за допомогою приладу для досліджень частот коливних, наявних у рідинах зародків кавітації, кратних резонансним [5]. Для запобігання надмірному перегріванню електромагнітів приводу в кавітаторах цього типу під час кавітаційної обробки рідин при підвищених температурах передбачено систему охолодження електроприводів.

Основними вузлами низькочастотного вібраційного електромагнітного кавітатора для кавітаційної обробки хімічно-активних рідин, рідин під тиском до 0,35 – 0,40 МПа та рідин при підвищених температурах є герметично закрита робоча камера із симетричними фланцями, до яких приєднано два циліндричні корпуси 3 із патрубками 1 подачі охолоджувальної рідини. Всередині кожного циліндричного корпусу 3 розміщені статор із обмоткою та якір електромагнітів приводу 4,

які від робочої камери герметизовано фланцем 7 із центральним отвором для переміщень штока якоря електромагніту. Між якорем та статором електроприводу встановлено виготовлену із пружного матеріалу мембрану, яка забезпечує коливання якоря із приєднаним до нього штоком з амплітудою до 3,5–4,0 мм.

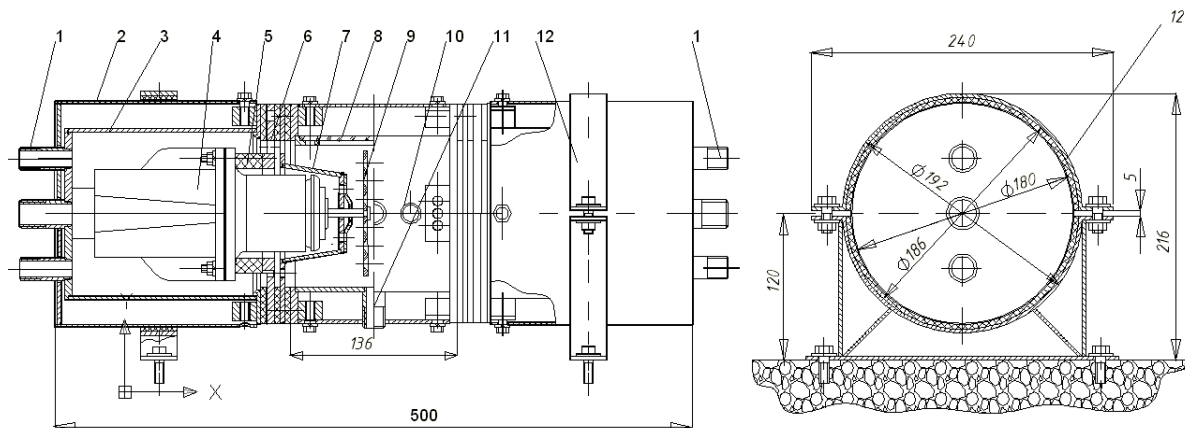


Рис.1. Принципова схема електромагнітного кавітатора для кавітаційної обробки хімічно-активних рідин, рідин під тиском та за підвищених температур

На штоках якорів електромагнітів закріплено дек-збурювачі кавітації 9, плоска чи конічна поверхня яких пронизана отворами для перетікання оброблюваної рідини. Робоча камера оснащена патрубками 11 для подачі та відводу оброблюваної рідини, супутніх обробці газів чи повітря (за технологічної потреби). Кавітатор із міркувань техніки безпеки закрито захисними кожухами 2, які встановлено на опорах 12. Беручи до уваги, що у кавітаторах цього типу відсутні пружні підвіски резонансного налаштування, у електричну схему живлення їх електромагнітів приводу долучено регулятор частоти напруги моделі AFC – 120, який дозволяє плавним регулюванням змінювати частоту притягування якоря електромагніту до його статора, змінюючи, отже, частоту коливань прикріплених до штока якоря дек-збурювачів кавітації. Електрична схема живлення електромагніту приводу через прилад моделі AFC – 120 описана в роботі [5]. У наслідок цього в процесі обробки рідин на цьому кавітаторі є можливість плавно наблизити частоту вібрацій коливних дек до частот, кратних частотам коливань наявних у оброблюваних рідинах зародків кавітації, тобто максимально наблизити роботу кавітатора до резонансних режимів. Адже саме резонансним режимам властиве мінімальне споживання енергії приводом, максимальні значення коефіцієнтів їх корисної дії.

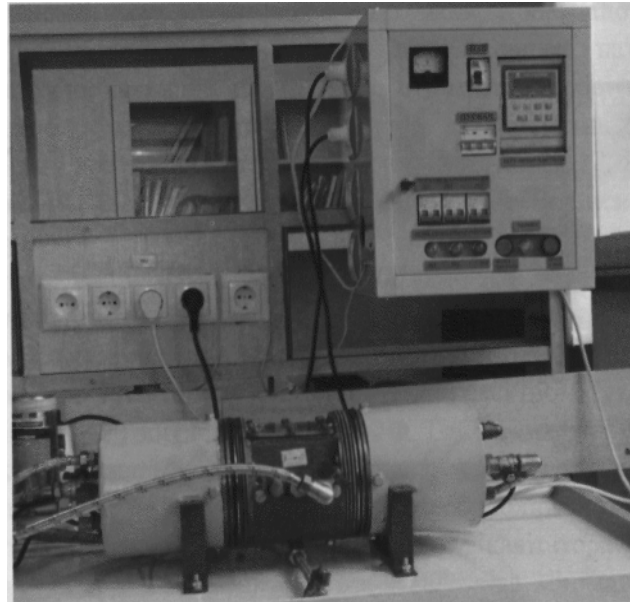
Для пониження вібрацій, що можуть передаватись від коливних частин кавітатора на несучі опори та поруч облаштоване устаткування, симетрично розташованим у циліндричних корпусах 3 якорям електромагнітів приводу надають синхронних протифазних коливань. Досягають цього відповідним під'єднанням до мережі живлення обмоток статорів електромагнітів. При цьому сили реакцій коливних переміщень обох якорів, будучи синхронними та протилежно напрямленими, через робочу камеру та циліндричні корпуси 3 взаємно погашають та нівелюють одна одну, зводячи до мінімуму передавання вібрацій на основу.

Визначивши оптимальні режими роботи кавітатора, на пульті його керування встановлюють необхідний діапазон частот змін напруги живлення електромагнітів приводу, патрубками через регульовальні дроселі подають у робочу камеру кавітатора оброблювану рідину та газ (за технологічної потреби) і обробляють рідину.

Ця дослідна установка віброрезонансної кавітаційної обробки рідин передбачає дві групи перемінних параметрів регулювання забезпечуваних нею показників якості кавітаційної обробки, а саме групу конструктивних та групу технологічних параметрів регулювання. До групи конструктивних тут належать :

- частота коливань дек-збурювачів кавітації, яку регулюють встановленим у пульті керування регулятором частоти моделі AFC - 120;
- амплітуда коливань дек-збурювачів кавітації, яку регулюють потужністю та конструктивними параметрами (проміжком між якорем та статором) електромагнітів приводу;
- напрям коливань дек-збурювачів кавітації (поздовж чи поперек оброблюваного рідинного потоку), який обумовлений розташуванням електромагнітів приводу.

Рис.2. Світлина електромагнітного кавітатора для кавітаційної обробки хімічно-активних рідин, рідин під тиском та за підвищених температур (із частково знятими захисними елементами кожуха)



Основним завданням зміни конструктивних параметрів тут є зміна швидкості та напрямів просторових переміщень дек-збурювачів кавітації у рідинному потоці, що в остаточному випадку впливає на діапазон віброрезонансного збурення кавітації.

До групи технологічних тут зараховано:

- тиск та швидкість оброблюваної рідини на ділянці кавітаційної обробки, які регулюють величинами витрат та подавання оброблюваної рідини на робочу ділянку;
- різновид, кількість та тиск супутнього до обробки газу чи повітря, які регулюють дроселюванням трубопроводу подавання газу;
- кількість наявних в оброблюваній рідині зародків кавітації, яку регулюють кількістю поданого на ділянку обробки газу;
- тривалість впливу кавітаційного поля на оброблювану рідину.

Основним завданням зміни технологічних параметрів є вплив на енергетичний стан оброблюваної рідини, на тривалість і якість її обробки.

Як наслідок, зміни конструктивних та технологічних параметрів тут забезпечують ефективний вплив на міцність оброблюваної рідини, її спроможність до збурення та стабільного існування в ній кавітаційних явищ, на інтенсивність формованого в ній кавітаційного поля, що і обумовлює якість кавітаційної обробки рідин.

Основні конструктивні параметри віброкавітаторів цього типу розраховують із передумов спроможності самозбурення в їх робочих ділянках кавітаційних явищ. Визначальними при цьому є швидкості формованих у робочій зоні газорідинних потоків, енергетичні параметри та швидкість переміщень в оброблюваній рідині збурювачів кавітації. Їх визначають із таких міркувань.

Із позицій молекулярної фізики створення певних передумов для появи і подальшого зростання із завжди наявних в рідині зародків кавітації кавітаційного поля, насиченого кавітаційними бульбашками, регламентується безрозмірним комплексом Рейнольдса Re , так званим числом Рейнольдса Re , яке пов'язує зміни характеристик потоків рідин певної густини та в'язкості із переміною швидкості та тиску рідини. Критичне число Рейнольдса $Re_{кр}$ можна трактувати як

параметр, що обумовлює поріг зародження у рідинній субстанції кавітації. У математичному виразі число Рейнольдса Re має вигляд

$$Re = \frac{r \cdot u \cdot L}{m} = \frac{u \cdot L}{n}, \quad (1)$$

де ρ – густина середовища, кг/м^3 ; v – швидкість потоку рідини, м/с ; μ – динамічний коефіцієнт в'язкості середовища, $\text{Па}\cdot\text{с}$; L – характерний для устаткування лінійний розмір, м . Тут $n = \frac{m}{r}$ – кінематична в'язкість, $\text{м}^2/\text{с}$.

Число Рейнольдса Re певним чином відображає взаємозв'язок між характером рідинного потоку та його швидкістю. 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 обумовлена такими параметрами рідини, як її густина та в'язкість, тиск та швидкість рідинного потоку, а також сформований цими параметрами градієнт міжмолекулярного напруженого стану в рідині.

Отже, задавшись у рівності (1) числовими значеннями параметрів оброблюваної рідинної субстанції та критичного числа Рейнольдса $Re_{кр}$, можемо визначити необхідну для збурення кавітації критичну швидкість коливних рухів виконавчих органів віброкавітаторів, тобто їх коливних дек $V_{д*}$ із залежності

$$V_{д*} = \frac{m \cdot Re_{кр}}{r \cdot L_{\theta}} = \frac{n \cdot Re_{кр}}{L_{\theta}}, \quad (2)$$

де L_{θ} – сумарний приведений розмір довжини кола отворів коливної деки, м . Для рідинних субстанцій із густиною та в'язкістю, наближеними до густини та в'язкості води, критичне число Рейнольдса $Re_{кр}$, зазвичай, $Re \geq (1,5 - 2,0) \cdot 10^5$.

За еліптичних чи кругових траєкторій коливань максимальна швидкість $V_{к \max}$, що є визначальною під час формування напруженого стану у потоці оброблюваних рідин, буде

$$V_{к \max} = 2 \cdot p \cdot f \cdot A, \quad \text{м/с}$$

Для забезпечення стабільної роботи віброкавітатора швидкість коливань дек $V_{к}$ повинна перевищувати критичну швидкість $V_{д*}$, тобто $V_{к} \geq V_{д*}$. Тому необхідна частота коливного руху дек

$$f = \frac{V_{к}}{2 \cdot p \cdot A} = \frac{m \cdot Re_{кр}}{2 \cdot p \cdot A \cdot r \cdot L_{\theta}} = \frac{n \cdot Re_{кр}}{2 \cdot p \cdot A \cdot L_{\theta}}, \quad 1/\text{с} \quad (3)$$

Для визначення потужності приводу і конкретної схеми його виконання визначають величину необхідного для подолання гідравлічного опору переміщенням виконавчих органів тягового зусилля F_T . Тягове зусилля F_T приводу, завдяки якому коливна дека під час свого руху долає опір з боку оброблюваної рідини, пропорційне сумарній величині тисків $\sum P_c$ на коливну деку, сумарній величині площі $\sum S_0$ бокової поверхні отворів для перетікання рідини у коливній деці та куту β нахилу коливних дек до напрямку потоку оброблюваної рідини, тобто

$$F_T = \left(\sum P_c \right) \cdot \left(\sum S_0 \right) \cdot \sin \beta. \quad (4)$$

Величину загальної споживаної віброкавітаційним обладнанням енергії можна подати у вигляді

$$E_{заг} = E_n + E_{эф},$$

де E_n – енергія нагрівання, що трансформується від великомасштабних пульсацій до пульсацій менших масштабів і перетворюється в теплову завдяки тертю окремих мікроструминок (прошарків) рідини між собою, Дж ; $E_{эф}$ – ефективна енергія, витрачена на кавітаційні процеси та ефекти, Дж .

Ту частину кінетичної енергії, що перетворюється в теплову, визначали експериментально, заміряючи температуру рідини впродовж певної тривалості її обробки,

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

де m – маса рідинного середовища, що обробляється в пристрої, кг; c – його теплоємність $\frac{\text{Дж}}{(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})}$;

T_k – температура середовища після обробки, $^\circ\text{C}$; T_0 – початкова температура, $^\circ\text{C}$; t – час обробки, с.

Ефективна складова енергії, що витрачається безпосередньо на утворення макро- і мікропотоків, кавітаційних ефектів, ініціювання хімічних реакцій, може бути визначена як різниця загальної енергії $E_{\text{заг}}$ та енергії, затраченої на нагрівання середовища, тобто

$$E_{\text{ef}} = E_{\text{заг}} - E_n.$$

Враховуючи, що енергія, затрачена на здійснення будь-якого технологічного процесу, зокрема і процесу кавітаційної обробки рідини, може бути визначена із залежності $\dot{L}_{\text{ef}} = N \cdot t$, де N – потужність приводу, Вт, t – тривалість обробки, год, величину питомої, тобто на одиницю об'єму оброблюваної рідини, енергії кавітаційного процесу можна вирахувати із залежності

$$\begin{aligned} e &= \frac{E_{\text{ef}}}{V_p} = \frac{N}{V_p} \cdot t = \frac{E_{\text{заг}} - E_n}{V_p} = \frac{N \cdot t - m \cdot c (T_k - T_0) \cdot t}{V_p} = \\ &= [N - m \cdot c (T_k - T_0)] \cdot \frac{t}{V_p}. \end{aligned} \quad (5)$$

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

Коефіцієнт корисної дії η віброкавітаційної обробки рідинного середовища

$$\begin{aligned} h &= \left(\frac{E_{\text{ef}}}{E_{\text{заг}}} \right) \cdot 100\% = \frac{1 - E_n}{E_{\text{заг}}} \cdot 100\% = \frac{[N \cdot t - m \cdot c (T_k - T_0) \cdot t]}{(N \cdot t)} \cdot 100\% = \\ &= \left\{ 1 - \frac{[m \cdot c (T_k - T_0)]}{N} \right\} \cdot 100\%. \end{aligned} \quad (6)$$

Визначальним чинником для стабільного підтримання кавітаційного процесу є кількість та енергетичний стан наявних у рідинній субстанції зародків кавітацій, якими переважно постають розчинені в рідині повітря, гази та зважені у ній різноманітні домішки. Відомо також, що мінімальні енерговитрати на стабільне підтримання у рідині кавітаційного процесу витрачаються за умови забезпечення резонансу коливань зародків кавітації. Очевидним, при цьому, є і той факт, що для різноманітних рідин, та навіть і для однієї і тієї ж рідини із різними значеннями температури чи кількістю домішок, частоти коливань зародків кавітації будуть різними. Як і різними будуть значення так вагомих для стабільності кавітаційного процесу резонансних частот коливань зародків.

На жаль, ні дослідного, ні промислового обладнання для визначення резонансних частот зародків кавітації та їх гармонік в рідинних субстанціях не існує. Потреба в обладнанні для визначення оптимальних значень частот зовнішніх енергетичних впливів, тобто частот, кратних частотам коливань зародків кавітації, зумовлена, передусім, необхідністю забезпечення кавітаційних полів у оброблюваних рідинних субстанціях максимальної інтенсивності, зменшенням енергозатрат на стабільне підтримання в них кавітаційного процесу, здешевленням органів керування промислового віброкавітаційного обладнання. Володіючи визначеною за допомогою цього приладу інформацією про кратність частот зародків кавітації для конкретних належних кавітаційній обробці рідин, можна відмовитись від вартісних регуляторів частот у пультах керування віброкавітаторів, забезпечуючи необхідні параметри амплітудо-частотних характеристик віброприводів збудовуючих кавітацію коливних дек безпосередньо системою живлення електромагнітів.

Тому для експериментального визначення частот коливань зародків кавітації, кратних резонансним, у досліджуваних рідинних субстанціях було створено дослідний прилад [5],

принципова схема якого зображена на рис.3, а світлина – на рис.4. Основними складовими приладу для досліджень частот коливань наявних у рідинах зародків кавітації, кратних резонансним, є циліндричний кавітатор 1 об'ємом 1 дм³, системи подачі до нього досліджуваних рідин 2 та газів 3, електромагнітний вібропривід 4 із коливними деками 5, що завдяки перетіканню крізь наявні в них отвори рідини забезпечують збурення кавітації, та мережа 6 живлення електромагніту віброприводу із приладом моделі AFC - 120 регулювання частоти напруги [5].

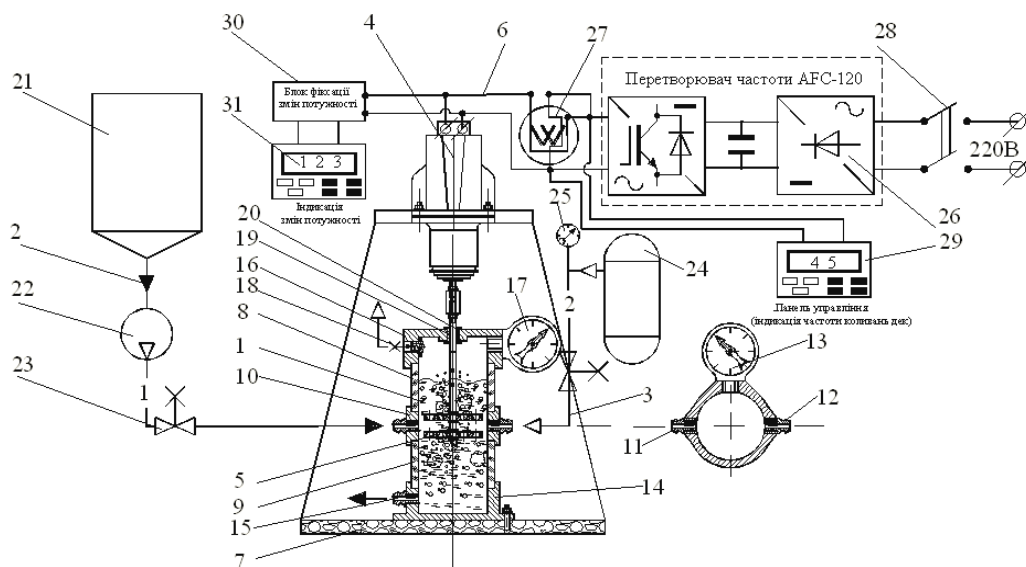


Рис. 3. Принципова схема приладу для визначення частот коливань зародків кавітації, кратних резонансним

Встановлений на нерухомій основі 7 кавітатор 1 містить дві співвісно розташовані прозорі циліндричні труби 8 та 9, розділені з'єднувальним кільцем 10, у яке вмонтовано патрубки 11 та 12 подачі у внутрішній простір кавітатора відповідно досліджуваних рідини та газу, а також манометр 13 фіксації тиску рідини всередині робочої ділянки кавітатора. Кавітатор 1 згори та знизу обмежений фланцями, що формують герметично замкнутий простір його робочої ділянки. На нижньому фланці 14 розміщено зливний патрубок 15, а на верхньому 16 – манометр 17 фіксації тиску газу всередині робочої ділянки кавітатора, регульований клапан 18 стравлювання надлишкового тиску та загерметизований підшипник ковзання 19 штока 20 приводу коливних рухів дек-збурювачів кавітації 5.

У систему подачі у кавітатор 1 рідини входить накопичувальна ємність 21 із досліджуваною рідиною, нагнітальний насос 22 її подачі, дросель 23 регулювання величини подачі та з'єднаний із патрубком 11 кавітатора трубопровід 1 подачі рідини. До системи подачі в робочу ділянку кавітатора 1 газу входять балон 24 із запасом необхідного для експерименту газу, регульований редуктор його витрат 25 із манометром тиску та з'єднаний із патрубком 12 кавітатора трубопровід 2 подачі газу.

Основними елементами мережі живлення електромагніту віброприводу 4 є під'єднаний до стаціонарної електромережі напругою 220 В та частотою перемінного струму 50 Гц регулятор 26 частоти, наприклад, моделі AFC - 120 із панеллю управління 29 та індикацією частоти коливань дек 5, увімкнений у його вихідне електричне коло ватметр 27 із блоками фіксації 30 та індикації 31 споживаної потужності електроприводу та вмикач 28 запуску і зупинки обладнання.

Дослідження умов збурення і стійкого підтримання віброрезонансних кавітаційних процесів у рідинних субстанціях та визначення в них частот коливань зародків кавітації, кратних резонансним, на цьому приладі здійснюють так. Із накопичувальної ємності 21 насосом 22, плавно регулюючи дроселем 23 подачу, по трубопроводу 1 досліджувану рідину подають у робочу ділянку

кавітатора 1, встановлюючи необхідну величину її тиску за манометром 13. Одночасно із балона 24 по приєднаному до патрубку 12 трубопроводу 2 в робочу ділянку кавітатора 1 подають певну кількість необхідного газу, відслідковуючи його тиск за манометром 17. Заповнивши робочу ділянку кавітатора 1 досліджуваною газорідинною сумішшю, трубопроводи подачі 1 та 2 перекривають і блоком 28 подають напругу на обмотки котушок живлення електромагнітного віброприводу 4. Притягуючи намагніченим осердям котушки до себе пружно встановлений якір, електромагніт 4 через встановлений у підшипнику ковзання 19 шток 20 приводу надає прикріпленим до нього і зануреним у досліджувану рідину декам 5 коливних зворотно-поступальних рухів. Частота коливань дек 5 дорівнює частоті генерації змінного струму, здійснюваної регулятором частоти напруги моделі AFC - 120, що ввімкнений у мережу 6 живлення електромагніту віброприводу 4. При стартовому запуску пристрою цю вихідну частоту на регуляторі AFC – 120 встановлюють такою, що дорівнює стандартній частоті електромережі, тобто 50 Гц. Увімкнутий у мережу 6 живлення електромагніту 4 ватметр 27, при цьому, відображає величину споживаної електромагнітом потужності. Регулюванням на пульті керування регулятора AFC - 120 частоти вихідної напруги плавно змінюють частоту коливань дек-збурювачів кавітації 5, візуально відслідковуючи, при цьому, зміни характеру рухів, стану та поведінки досліджуваної рідини та формованого в ній деками 5 кавітаційного поля, бульбашок та каверн – зародків кавітації, а також покази ватметра. По мірі наближення частот коливань дек 5 до значень частот, кратних резонансним частотам коливань, наявних у рідині зародків кавітації, досліджувана газорідинна суміш, завдяки стрімкому збільшенню в ній, колись розчинених, а тепер вивільнених, бульбашок повітря та газів, стрімко втрачає свою міцність. За коливними деками 5, формуються ділянки розрідження, що фіксується показами манометра 13, стрибкоподібно понижується величина споживаної електромагнітом приводу потужності, що відображається на показах ватметра 27.

Фіксують покази манометра 13, ватметра 27, а головне, -- відображену на індикаторному пульті керування регулятора моделі AFC – 120 частоту живлення електромагніту приводу, при якій відбулися стрімкі зниження тиску та споживаної потужності в кавітаторі. Плавними змінами до збільшення та зменшення від зафіксованої частоти, відслідковуючи покази ватметра 27, встановлюють ширину та межі діапазону виявлених частот кратності. При виході за межі цього діапазону кратності резонанс зародків кавітації щезає і споживана електромагнітом приводу потужність стрімко наростає, що легко зафіксувати візуально або за допомогою додаткової увімкнутої в мережу його живлення електронної сигнальної апаратури.

Дослідивши один діапазон частот, кратних резонансним частотам коливань зародків кавітації, знову регулятором частоти моделі AFC – 120 нарощують (чи у разі потреби понижують) частоту коливань дек 5 до появи чергового періоду кратності резонансу, де повторюють всі вищеописані дії. Так досліджують весь діапазон сприйнятних для приводу промислового віброкавітатора частот, обравши для нього ті значення, за яких віброкавітаційна обробка найефективніша із технологічних міркувань та вимог до параметрів кінцевої якості оброблюваних рідинних субстанцій.

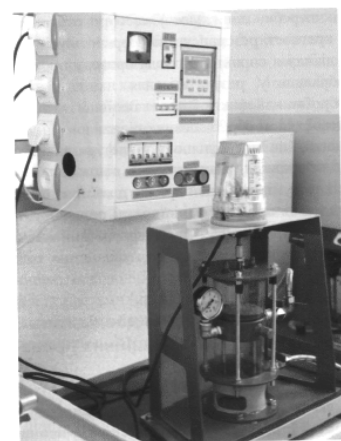


Рис. 4. Світлина дослідного приладу для визначення частот коливань зародків кавітації, кратних резонансним

Слід відмітити, для переважної більшості рідинних субстанцій резонанси частот коливань зародків кавітації, зазвичай, перебувають у діапазонах кілогерц, а то і їх десятків та сотень. І зрозуміло, що цей прилад для їх визначення не придатний. У цьому випадку йдеться про так звані “кратні резонансу частоти” коливань зародків, періодичний і тривалий в часі енергетичний вплив на які, хоч і із незначною затримкою, та все ж вводить у резонанс цю коливну газорідинну систему.

Кратні резонансним діапазони частот коливань збурювачів кавітації надзвичайно чутливі до фізичних параметрів оброблюваних рідин (густини, в'язкості, поверхневого натягу тощо), а особливо до умов обробки – температури і тиску середовища. На рис. 5 наведено графік залежності частот кратності $f_k, 1/c$ резонансу від температури $T, ^\circ C$ та тиску $p_{над}, МПа$ забрудненої сечовиною стічної води басейну.

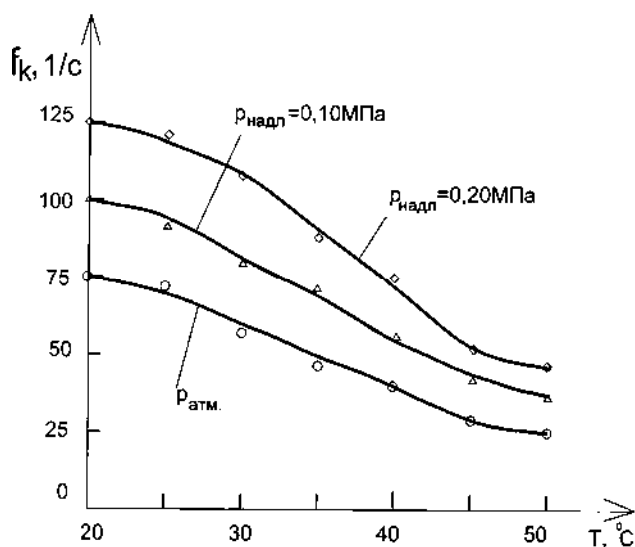


Рис. 5. Залежність частот f_k кратності резонансу від температури $T, ^\circ C$ та тиску $p_{над}, МПа$ при віброрезонансній обробці стічної води басейну

Як слідує із цього графіка, при вихідній температурі $20 ^\circ C$ та атмосферному тиску $p_{атм}$ діапазон частот коливань зародків кавітації, що кратний резонансним, перебуває в межах 70 – 75 Гц. При цій же температурі по мірі наростання надлишкового тиску $p_{над}$ до 0,10 МПа та 0,20 МПа частота кратності підвищується до 95 – 100 Гц та 120 – 125 Гц відповідно. За підвищення температури, не залежно від тиску, зберігається спільна тенденція – до температури 30 – 35 $^\circ C$ частота істотно не змінюється, а при подальшому нарощуванні температури стрімко знижується до 25 – 30 Гц. Тут правомірно напрашується висновок про доцільність кавітаційної обробки за підвищених температур, адже чим вищі значення частот кратності, тим більші енергозатрати на підтримування стабільного віброкавітаційного процесу.

Однак і затрати на додаткове нагрівання оброблюваних рідин, особливо коли йдеться про масові виробництва, теж доволі відчутні. Тому тут на етапі запровадження процесу необхідна вдумлива експериментальна перевірка.

Експериментально встановлений за допомогою вищеописаного приладу діапазон частот коливань зародків кавітації, що кратний резонансним, для розчинів на основі природної води за нормальних умов (атмосферному тиску 730 мм рт. ст. та температури $20 ^\circ C$) становлять 64 – 70 Гц. Під час кавітаційної обробки при таких частотах коливань збурювачів кавітації на (25 – 30)% наростає амплітуда коливань, що підвищує інтенсивність сформованого тут кавітаційного поля, на (20 – 25)% скорочує тривалість обробки рідини. Поряд з тим, було відзначено, що підвищення температури оброблюваної рідини знижує чисельні значення кратного діапазону частот у середньому на (1 – 1,2) Гц при підвищенні температури на $1 ^\circ C$, а нарощування тиску оброблюваної рідини, навпаки, підвищує значення кратного діапазону частот.

Висновки. Вперше розроблено принципову схему та виготовлено дослідний взірець низькочастотного віброкавітатора резонансної дії, спроможного за продуктивності до $2,0 \text{ м}^3/\text{год}$ забезпечувати високоякісну кавітаційну обробку хімічно-активних рідин, рідин під тиском та за підвищених температур. Розроблено і експериментально досліджено прилад для визначення резонансних частот коливань зародків кавітації у рідинах, що кратні резонансним частотам. Кавітаційна обробка рідин у діапазонах кратності частот підвищує інтенсивність сформованого кавітаційного поля та на (20 – 25) % скорочує тривалість обробки рідини. Експериментально встановлено, що для рідин на основі води підвищення температури оброблюваної рідини знижує чисельні значення кратного діапазону частот у середньому на (1 – 1,2) Гц при підвищенні температури на 1°C , а нарощування тиску оброблюваної рідини, навпаки, значення кратного діапазону частот підвищує.

1. Сілін Р. І. Вібраційне обладнання на основі гідропульсатора / Р. І. Сілін, А. І. Гордєєв. – Хмельницький: ХНУ, 2007. – 386 с. 2. Шевчук Л. І., Афтаназів І. С., Строган О. І. Вібраційний електромагнітний кавітатор резонансної дії // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. Український міжвід. наук.-техн. зб. – Нац. ун-т “Львівська політехніка”, 2011. – Вип. № 45. – С. 374–380. 3. Пат. України № 66550. Вібраційний електромагнітний пристрій для збурення кавітації / Старчевський В. Л., Шевчук Л. І., Афтаназів І. С., Строган О. І., заявл. 06.06.2011; опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1. 4. Пат. України №104571. Низькочастотний віброрезонансний кавітатор / Старчевський В. Л., Шевчук Л. І., Афтаназів І. С., Строган О. І., заявл. 11.06.2013; опубл. 10.02.2014, Бюл. № 3. 5. Патент України № 75274 Спосіб кавітаційної обробки рідин / Старчевський В. Л., Шевчук Л. І., Афтаназів І. С., Строган О. І. заявл. 18.05.2012; реєстраційний номер u 201206022, опубл. 26.11.2012 бюл. № 22.