

ОБҐРУНТУВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ТА КОНСТРУКТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ ДЛЯ ЗНЕЗАРАЖУВАННЯ ТА ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДИ

Створено обладнання, яке застосовує низькочастотні вібрації для формування кавітаційних полів у рідинних субстанціях, що обробляються з метою зміни їх властивостей та знезаражування. Для дослідження динаміки роботи вібраційної машини і аналізу впливу режимів роботи приводу та конструктивних параметрів на ефективність процесу знезаражування і зміну властивостей води побудовано динамічну модель та систему диференціальних рівнянь, які описують процеси, що проходять у робочому органі вібраційної машини. З аналізу аналітичної моделі отримано графічні залежності впливу конструктивних параметрів та режимів роботи приводу на зміну максимального тиску у робочому органі вібраційної машини. За допомогою відеозйомки проведено візуалізацію процесів, що проходять у робочому органі вібраційної машини та встановлено виникнення кавітаційних процесів у робочому органі вібраційної машини. У результаті проведених досліджень встановлено виникнення кавітаційних процесів, які можуть впливати на реальний максимальний тиск у робочому органі вібраційної машини, тому є необхідність провести експериментальні дослідження з вимірювання дійсного максимального тиску в запропонованому обладнанні для встановлення оптимальних параметрів приводу: частоти та амплітуди коливань, розмірів поршня та насадка їх співвідношення.

Ключові слова: властивості води, знезаражування, вібраційні машини, кавітація.

N.O. KOSTIUK, A.I. HORDEEV, O.A. HORDEEV

Khmelnitsky National University

JUSTIFICATION OF DYNAMIC AND CONSTRUCTIVE PARAMETERS OF A VIBRATION MACHINE FOR DISINFECTION AND CHANGE OF WATER PROPERTIES

Equipment that uses low-frequency vibrations for the formation of cavitation fields in liquid substances, which are processed with the purpose of changing their properties and decontamination, was created. To study the dynamics of the vibration machine and to analyze the effect of the drive modes and design parameters on the efficiency of the process of disinfection and change of water properties, a dynamic model and a system of differential equations describing the processes taking place in the working body of the vibrating machine are constructed. In the analysis of the dynamic model, the following assumptions are used: when the fluid oscillations, the law of liquid indissolubility (there is no gap – cavitation), the effect of temperature on the liquid is not taken into account, the amount of dissolved air content is taken into account. From the analysis of the analytical model graphical dependences of the influence of the design parameters and modes of operation of the actuator on the change of the maximum pressure in the working body of the vibrating machine were obtained. As a result of the conducted researches it is established that with increasing frequency of oscillations, piston diameter and amplitude of oscillations maximum pressure in the pulsation chamber increases. It was also found that with increasing oscillation frequencies and decreasing nozzle diameter, the maximum pressure in the pulsation chamber increases. Through video recording, the processes occurring in the working body of the vibrating machine were visualized and the occurrence of cavitation processes in the working body of the vibrating machine was determined. As a result of the conducted researches the occurrence of cavitation processes that can influence the real maximum pressure in the working body of the vibrating machine is established, therefore it is necessary to carry out experimental researches on measuring the real maximum pressure in the proposed equipment to establish the optimal drive parameters: frequency and amplitude of oscillations, piston sizes and sizes. nozzle of their ratio.

Keywords: water properties, decontamination, vibrating machines, cavitation.

Вступ

Унікальні властивості вібраційного поля дозволяють успішно здійснювати не лише оздоблювально-зачисні операції та зміцнювальні технології, сепарацію, перемішування, вібраційне транспортування у важких експлуатаційних умовах, гомогенізацію, фільтрування, сушіння, насичення середовища певними речовинами, руйнування поверхонь, але і такі операції, як знезаражування водних потоків та зміну їх властивостей. Усе це обумовлює широке і ефективне застосування вібраційних технологічних машин в багатьох галузях промислового виробництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Як показали дослідження [1, 2] динамічних явищ у багатофазових рідинних середовищах, підданих керуванню вібраційним впливом, багато з них можуть бути успішно використані як для інтенсифікації зазначених процесів, так і при розробленні та реалізації принципово нових технологічних прийомів та вібраційних машин, а саме зміни властивостей та знезаражування водних потоків.

Одним із явищ, що впливає на дисперсність та хімічний склад рідини, є кавітація. Кавітація – явище розриву рідини під дією напружень, які виникають в ході появи розрідження в краплині рідини. При розриві краплини рідини утворюються порожнини – кавітаційні пухирці, заповнені газом чи паром. Отже, розрив рідини обумовлений зміною характеристик швидкостей і тисків. Кавітаційні пухирці утворюються в тих місцях, де тиск у рідині стає нижчим деякої критичної величини. Якщо тиск знижується внаслідок зростання локальних швидкостей потоку краплинної рідини, то кавітацію називають гідродинамічною, якщо ж зниження тиску викликане проходженням акустичних хвиль, то кавітацію називають акустичною.

Критичне значення тиску, за якого відбувається розрив рідини, залежить від багатьох чинників: від чистоти рідини, вмісту у ній повітря, стану поверхні, на якій виникає кавітація. Кавітація може виникати в потоці рідини, що має змінний тиск, а також поблизу і на поверхні тіл різної форми у місцях найбільшого розрідження. Змінне поле тиску створюється різними чинниками: у результаті зміни швидкості потоку (руху тіла), впливу форми тіла, в наслідок коливального впливу на рідину (ультразвук або вібрації).

За останній період з'явився новий напрямок створення вібраційного обладнання для оброблення води кавітаційним процесом, який забезпечує надання воді нових властивостей та її знезараження [4–6]. Однак їм притаманні деякі недоліки – незначний час одноразового перебування рідини у стані виникнення кавітаційної зони. У Хмельницькому національному університеті створено ряд вібраційних машин для кавітаційного оброблення води з метою знезаражування та зміни її властивостей [7–10], які побудовані на основі багаторазового впливу на рідину у кавітаційній зоні.

Актуальність дослідження

Дослідження, що спрямовані на пошуки новітніх конструктивних рішень машин для зміни властивостей та знезаражування водних потоків із досконалою динамікою роботи, спрямованих на мінімізацію енерговитрат за умови їх придатності для промислового застосування, залишається вагомим науково-технічним завданням, так і суспільною проблемою. Тому дослідження процесу виникнення кавітації під час колювання рідини, проектування та розроблення на основі цього нових конструкцій технологічного вібраційного обладнання, у якому рідина виступає як об'єкт, що піддається керованим вібраційним впливам для зміни його властивостей та знезараження і зумовлюють актуальність порушеного завдання.

Виклад основного матеріалу

Запропоновано спосіб та конструкції обладнання для утворення пульсуючих струменів рідини [10], в якому використовується зворотно-поступальний рух рідини через насадок із гострими крайками на вході. При цьому на виході з насадка гідропульсатора отримується пульсуючий струмінь рідини, а при певних режимах його роботи утворюється струмінь із включеннями газових пухирців, що виділяються з рідини внаслідок кавітаційних явищ. На стадії прямої дії акустичних коливань на хід процесу можуть впливати тільки хімічно активні гази, тобто, O_2 і H_2 . У кінцевому результаті вплив кавітації на водні розчини зводиться до єдиного процесу – розщеплення молекул води в кавітаційних пухирцях. Незалежно від природи розчинених у воді речовин акустичні коливання впливають лише на воду, що призводить до зміни її фізико-хімічних властивостей – збільшення рН, електропровідності, числа вільних іонів і активних радикалів, а також структуризації та активації молекул. Окрім того різко збільшується швидкість реакції збуджених коливаннями молекул води з радикалами водню із виділенням складових OH та H_2 . Ці процеси насичують рідину радикалами $OH^\cdot$, $O^\cdot$, $O^\cdot$ та активними газами O_2 , H_2 . З іншого боку, зростають електричні нестационарні сили взаємодії між сусідніми диполями, які посилюють їх коливання як цілісного об'єкту і збільшують вірогідність руйнування рідкокристалічної структури рідини. Для підвищення ефективності процесу необхідно збільшити однократність вказаних впливів, що обумовлює високий ступінь зворотності реструктуризації та призводить до часткового повернення води до стану попередньої структури та, як наслідок, до низького ступеня її кінцевої реструктуризації.

Знезаражуюча дія кавітації заснована на ефектах, які виникають у турбулентних потоках рідини. Так при гідродинамічних коливаннях рідини виникають і зникають кавітаційні пухирці. При цьому стимулюються фазові переходи, підвищуються локальні температура і тиск. Окрім того, у моменти утворення і зникнення кавітаційних пухирців у газонаповненій порожнині створюються умови для появи електричних зарядів, електричних і магнітних полів. У такий спосіб рідина, яка оброблюється кавітацією, піддається термобаричній і електромагнітній дії. Особливістю кавітаційного методу оброблення води полягає в тому, що високий ступінь знезаражування води від яєць і личинок паразитів досягається за рахунок їх механічного руйнування ударними хвилями. Для руйнування бактерій і вірусів термобаричний вплив підсилюється локальною електромагнітною дією, коли наведені електричні потенціали пробивають їх мембрани і оболонки.

Механічні та фізичні способи очищення води є перспективними. На даний час розроблено ряд нових вібраційних машин та обладнання, у яких вода піддається багаторазовому зворотно-поступальному проходженню (циклічній гідрокавітації) через кавітаційний пристрій. Типовим представником цієї гами є конструкція вібраційного обладнання поршневого типу з ексцентриковим приводом. Застосування такого приводу дає можливість здійснювати жорсткий керований вплив на процес виникнення кавітаційних порожнин з утворенням кавітаційних пухирців шляхом підбору конструктивних параметрів обладнання та режимів його роботи [10].

Вібраційна машина для зміни властивостей та знезаражування водних середовищ (рис. 1, рис. 2) складається із корпусу 1, на якому на стійках 2 встановлено плиту 3. На фланці 4 встановлено електродвигун 5, а також підшипникову опору 6, в якій знаходиться вал 7, з'єднаний з електродвигуном 5 муфтою 8. На валу 7 встановлено ексцентрик 9 у підшипниковому корпусі шатуна 10, який з'єднаний зі штоком 11 пальцем 12. На штокові 11 встановлено поршень 13 з отворами 14, які мають гострі крайки. З'єднання шток-штулка, яка знаходиться в корпусі 15, що закріплений на кришці 16, забезпечує можливість зворотно-поступального руху штока. На штокові 11 також встановлено гумовий відбійник 17. Поршень 13 входить у циліндр 18, який знизу закритий кришкою 19, що має отвір 20 під кран для заливання водного середовища

21. Циліндр 18 кріпиться стійками 22 до корпусу 1. До підшипникової опори 6 болтами приєднана планка 23, до якої і водночас до плити 3 з допомогою болтів прикріплені два упори 24. Між упорами 24 та підшипниковим корпусом шатуна 10 на пальцях 25 встановлені дві пружини 26. Просторова 3D-модель вібраційної машини для знезаражування водних середовищ з ексцентриковим приводом представлена на рис. 2.

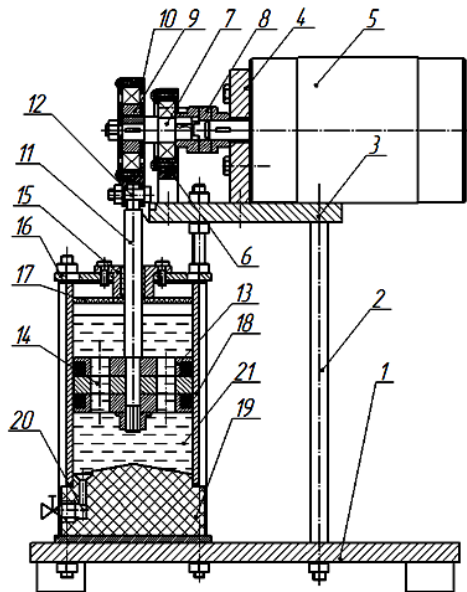


Рис. 1. Перетин А-А (до рис. 1)

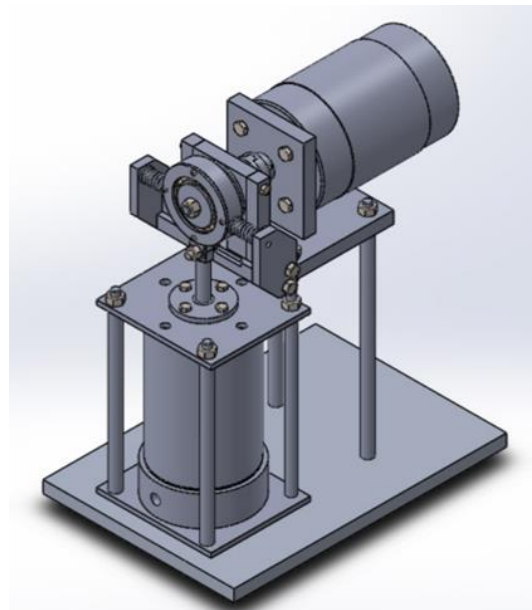


Рис. 2. Просторова 3D-модель вібраційної машини

Для побудови аналітичної моделі робочого органу, запропонованої конструкції вібраційної машини, розроблена його принципова схема, яка представлена на рис. 3.

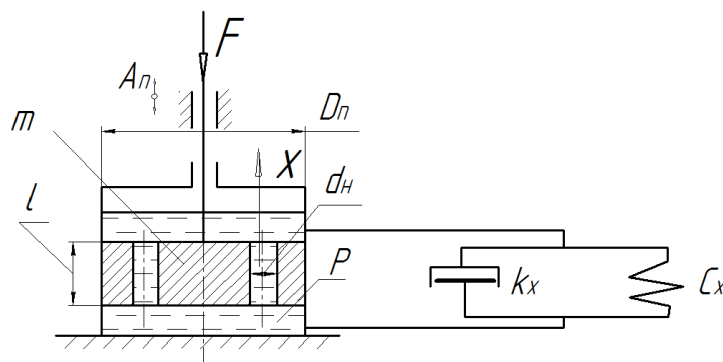


Рис. 3. Принципова схема робочого органу вібраційної машини

Для дослідження динаміки роботи вібраційної машини і аналізу впливу режимів роботи приводу та конструктивних параметрів на ефективність процесу знезаражування і зміні властивостей води запропоновано наступну систему диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} A_n dS_1 = A_n dS_2; \\ m\ddot{x} + k_x \dot{x} + c_x x = F \sin \omega t, \end{cases} \quad (1)$$

де $F = \frac{\pi D_n^2 \cdot P_{\max}}{4}$ – сила, що діє на шток робочого органу;

m – маса рідини, яка отримує коливальний рух;

D_n – діаметр поршня;

S_2 – площа насадка;

S_1 – площа поршня;

A_n – амплітуда коливання поршня;

A_n – амплітуда коливання рідини у насадку;

$P_{\max}$ – максимальний тиск у камері пульсації;

C_x – жорсткість пружного середовища рідини з пухирцями з урахуванням пружності стінок циліндра.

Під час аналізу динамічної моделі використано наступні припущення: при коливаннях рідини діє закон нерозривності рідини (відсутній її розрив – кавітація), вплив температури на рідину не враховується, враховується кількість вмісту розчиненого повітря. В дослідженнях будемо визначати максимальний тиск $P_{\max}$ у камері пульсації при ході поршня униз при куті повороту $\varphi = 0,25\pi$.

Як вказувалося раніше, основним критерієм ефективності процесу знезаражування і зміни властивостей рідини є величина максимального тиску у рідині при коливаннях робочого органу, тому необхідно визначити вплив на максимальний тиск рідини $P_{\max}$ у камері пульсації наступних параметрів вібраційної машини: f – частоти коливань віброприводу; A_k – амплітуди коливань поршня; розмірів: D_n – діаметра поршня; d_n – діаметра насадку.

З першого рівняння системи (1) згідно з законом нерозривності рідини можна записати наступну залежність:

$$x = A_n = \frac{\varepsilon D_n^2 \cdot A_n}{d_n^2}, \quad (2)$$

де A_n – амплітуда коливань рідини у насадку;
 A_n – амплітуда коливань поршня в камері пульсації;
 D_n – діаметр поршня;
 d_n – діаметр насадку;
 ξ – коефіцієнт урахування звуження потоку рідини у насадку.

Тоді швидкість рідини у насадку визначається наступною залежністю:

$$\dot{x} = \frac{\varepsilon D_n^2 \cdot A_n \cdot f}{d_n^2}, \quad (3)$$

де f – частота коливань віброприводу.
 Прискорення рідини у насадку визначається наступною залежністю:

$$\ddot{x} = \frac{\varepsilon D_n^2 \cdot A_n \cdot f^2}{d_n^2}. \quad (4)$$

Тоді друге рівняння (1) можна записати у наступному вигляді:

$$m \frac{\varepsilon D_k^2 A_k}{d_n^2} f^2 + k \frac{\varepsilon D_k^2 A_k}{d_n^2} f + c \frac{\varepsilon D_k^2 A_k}{d_n^2} = \frac{\pi D_k^2}{4} P_{\max} \quad (5)$$

Провівши перетворення отримаємо наступне рівняння для визначення тиску:

$$m \frac{4 \varepsilon A_k}{\pi d_n^2} f^2 + k \frac{4 \varepsilon A_k}{\pi d_n^2} f + c \frac{4 \varepsilon A_k}{\pi d_n^2} = P_{\max} \quad (6)$$

Демпфуючу здатність поршня з отворами та жорсткість пружного середовища рідини з пухирцями з урахуванням пружності циліндра знайдемо за формулою:

$$k_x = \frac{8\pi D_n^4}{d_o^2} \mu \cdot l / d_N, \quad (7)$$

де μ – динамічний коефіцієнт густини, $\mu = 8,94 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$;
 l – довжина отвору, $l = 0,045 \text{ м}$;
 d_N – кількість отворів $d_N = 1$.

Уявний модуль пружності рідини визначається за формулою Кортєвича [11]. Звідки жорсткість пружного середовища рідини з пухирцями з урахуванням пружності стінок циліндра знаходиться за залежністю:

$$C_x = \frac{E_{\text{сум}} + E \cdot \delta_k}{E \cdot \delta_k + D_n}, \quad (8)$$

де $E_{\text{сум}}$ – модуль об'ємної пружності газорідинної суміші;

E – модуль пружності матеріалу стінок циліндра; ($E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$);

δ_k – товщина стінок циліндра; $\delta_k = 5 \text{ мм}$;

D_n – діаметр поршня.

Вплив вмісту розчиненого повітря на пружність рідини (води) дається Д.Н. Поповим [12] у вигляді:

$$E_{\text{сум}} = \frac{E_{\text{рід}} \left[1 + \frac{V_{\text{нов}}}{V_{\text{рід}}} \left(\frac{P_0}{P} \right)^{1/k} \right]}{1 + \frac{E_{\text{рід}} V_{\text{нов}}}{k P V_{\text{рід}}} \left(\frac{P_0}{P} \right)^{1/k}}, \quad (9)$$

де $E_{\text{рід}}$ – модуль об'ємної пружності рідини (для води $E_{\text{рід}} = 20 \cdot 10^8 \text{ Па}$);

$V_{\text{нов}}$ – об'єм повітря;

$V_{\text{рід}}$ – об'єм рідини;

P_0, P – абсолютні тиски, $P_0 = P_{\text{атм}}$;

k – показник адіабати (для повітря $k = 1,4$).

Рівняння (6) дозволяє оцінити вплив різних параметрів на величину тиску P_{max} при русі поршня униз (стискання рідини) зі зміною частоти пульсацій. За допомогою програмного продукту Mtcad були проведені розрахунки та побудовані графіки залежності величини тиску P_{max} у камері пульсації від частоти при зміні розміру діаметра насадка d_n рис. 4, при зміні амплітуди коливань A рис. 5, при зміні розміру діаметра поршня D_n рис. 6.

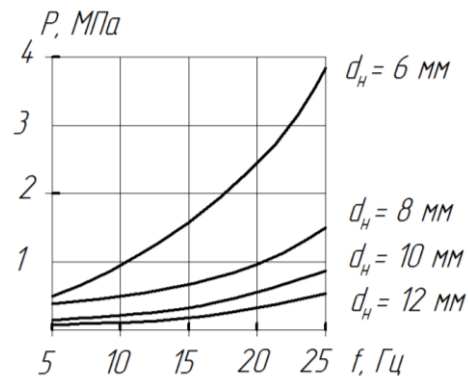


Рис. 4. Графіки залежності тиску P_{max} в рідині від частоти коливань f при зміні діаметра насадка d : амплітуда коливань $A_n = 2 \text{ мм}$; діаметр поршня $D_n = 100 \text{ мм}$; маса рідини, що коливається $m = 0,1 \text{ кг}$

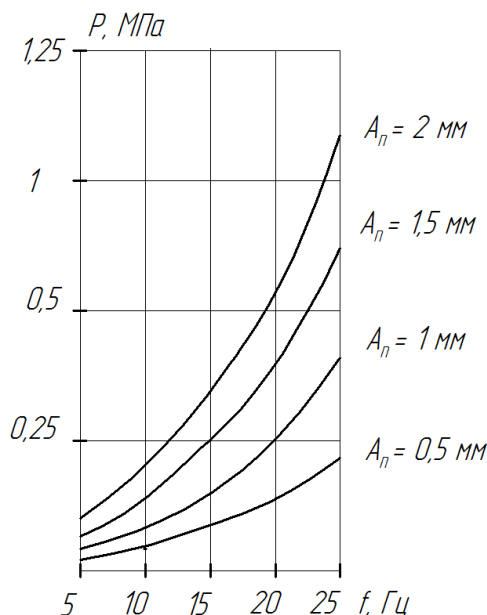


Рис. 5. Графіки залежності тиску P_{max} в рідині від частоти коливань f при зміні амплітуди коливань A_n : діаметр поршня $D_n = 100 \text{ мм}$; діаметр насадка $d = 10 \text{ мм}$; маса рідини, що коливається $m = 0,1 \text{ кг}$

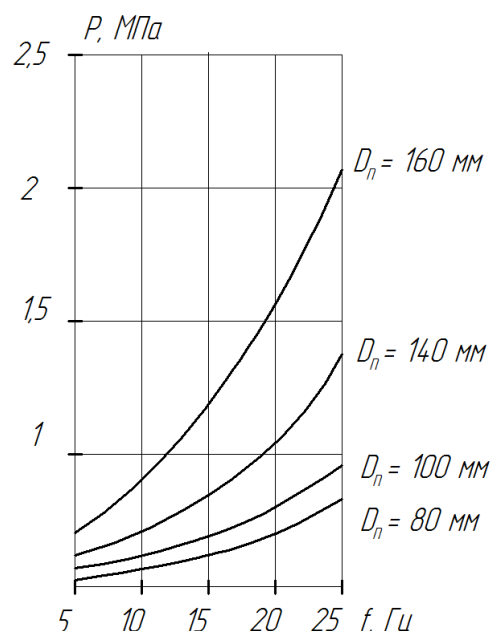


Рис. 6. Графіки залежності тиску P_{max} в рідині від частоти коливань f при зміні діаметра поршня D_n : діаметр насадка $d = 10 \text{ мм}$; амплітуда коливань $A_n = 2 \text{ мм}$; маса рідини, що коливається $m = 0,1 \text{ кг}$



Рис. 7. Фотографія прозорого каналу з рідиною, що коливається в момент втягування рідини у камеру пульсації: виникнення кавітаційної каверни та кавітаційних пухирців при частоті коливань 5 Гц



Рис. 8. Фотографія прозорого каналу з рідиною, що коливається в момент втягування рідини у камеру пульсації: виникнення кавітаційної каверни та кавітаційних пухирців при збільшенні частоти коливань до 10 Гц

У результаті проведених аналітичних досліджень встановлено, що із збільшенням частоти коливань, діаметра поршня та амплітуди коливань максимальний тиск у камері пульсації зростає. Також встановлено, що при збільшенні частоти коливань та зменшенні діаметра насадка максимальний тиск у камері пульсації зростає. Треба зазначити, що при збільшенні діаметра поршня будуть зростати інерційні параметри машини, що призведе до збільшення реактивної маси (основи машини), зростуть енергетичні витрати приводу. При зменшенні діаметра насадка, при певному діаметрі поршня, зменшиться виток рідини крізь насадок в наслідок чого знизиться продуктивність процесу знезаражування. Тому у подальших дослідженнях необхідно буде визначити оптимальні співвідношення конструктивних параметрів та режимів роботи вібраційного приводу при отриманні максимального тиску у робочому органі вібраційної машини.

Для визначення реальної картини протікання рідини крізь насадок у коливальному режимі (з урахуванням виникнення кавітаційних процесів) було створено дослідну установку з прозорим каналом та проведена відеозйомка зворотно-поступального руху рідини у каналі для виявлення процесу виникнення кавітаційних процесів. Були отримані фотографії процесів, які виникають при проходженні рідини крізь канал січенням 10x10 мм при коливаннях на різних частотах (від 0 до 24 Гц) з амплітудою 2 мм при діаметрі поршня 100 мм (рис. 7 – рис. 12)



Рис. 9. Фотографія прозорого каналу з рідиною, що коливається в момент втягування рідини у камеру пульсації: виникнення кавітаційної каверни та кавітаційних пухирців при збільшенні частоти коливань до 14 Гц

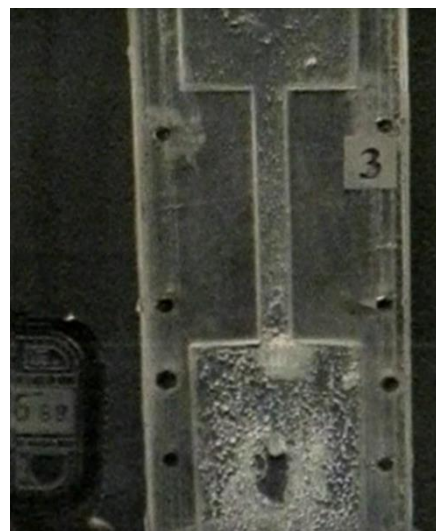


Рис. 10. Фотографія прозорого каналу з рідиною, що коливається в момент втягування рідини у камеру пульсації: виникнення кавітаційної каверни та кавітаційних пухирців при збільшенні частоти коливань до 16 Гц; поява великої кавітаційної каверни

На початковому етапі у момент втягування рідини у камеру пульсації при частоті коливань 5 Гц (рис. 7) спостерігається виникнення кавітаційної каверни при вході у канал та в камері пульсації з'являються кавітаційні пухирці. Із зростанням частоти до 10 Гц спостерігається значне зростання кількості кавітаційних пухирців та збільшення їх розмірів (рис. 8). Із зростанням частоти до 14 Гц відбувається зрив кавітаційної каверни при вході у канал, спостерігається рух кавітаційних пухирців у камеру пульсації (рис.9). Із зростанням частоти до 16 Гц спостерігається виникнення у камері пульсації поява великої кавітаційної каверни у наслідок розриву рідини по границях пухирців.

На етапі руху рідини уверх рис. 11. та рис. 12 спостерігається каверна вході у канал з іншої сторони каналу (рис. 11) та спостерігається збільшення її розмірів із збільшенням частоти коливань, а у камері пульсації спостерігаються газові пухирці, які не сплеснулися, а газ у них стиснено, що відіграє негативну функцію – збільшення об'ємної пружності рідини у камері пульсації, що веде до зменшення об'єму рідини, що виштовхується (зменшується виток крізь канал, відповідно зменшується продуктивність процесу знезаражування).

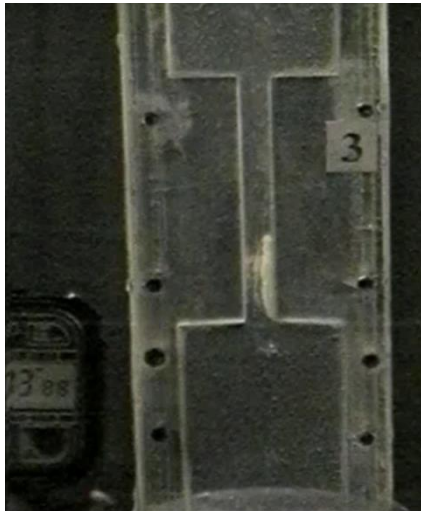


Рис. 11. Фотографія прозорого каналу з рідиною, що коливається в момент виштовхування рідини у насадок виникнення кавітаційної каверни та сплескування кавітаційних пухирців при частоті коливань 5 Гц

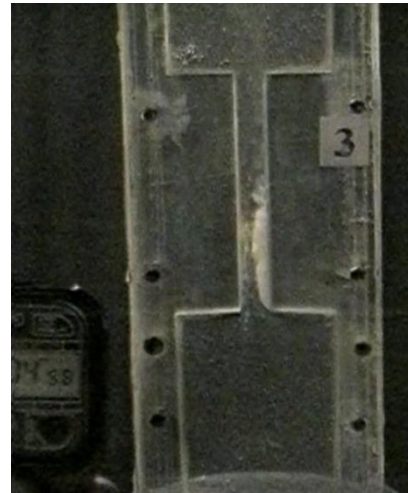


Рис. 12. Фотографія прозорого каналу з рідиною, що коливається в момент втягування рідини у камеру пульсації: виникнення кавітаційної каверни та кавітаційних пухирців при збільшенні частоти коливань до 10 Гц

У результаті проведених досліджень з візуалізації процесу зворотно-поступального протікання рідини крізь канал встановлено, що залежно від частоти та амплітуди коливань і варіації конструктивних параметрів робочого органу у рідині виникають кавітаційні процеси: при ході поршня уверх створюється зниження тиску у камері пульсації та поява кавітаційних каверн при вході у верхній частині каналу, а у камері пульсації спостерігається зростання кількості кавітаційних пухирців та їх розмірів; при ході поршня униз спостерігається поява кавітаційних каверн при вході у нижній частині каналу, а у камері пульсації проходить сплескування кавітаційних пухирців але незначна кількість газонаповнених пухирців тільки стискаються до певних розмірів і вони виштовхуються з камери пульсації крізь канал. Наявність такої пружної фази зменшує величину витoku рідини крізь канал. Тому у подальших дослідженнях планується провести експериментальне дослідження по визначенню фактичної зміни тиску у камері пульсації при зміні режимів роботи приводу та конструктивних параметрів робочого органу з урахуванням кавітаційних процесів при зворотно-поступальному протіканні рідини крізь насадок.

Висновки

1. Встановлено, що зі збільшенням частоти коливань поршня зростає тиск у камері робочого органу завдяки збільшенню швидкості перетікання рідини у насадок з виникненням ефекту гідравлічного удару.
2. Результати аналізу аналітичної моделі показали значне зростання максимального тиску при збільшенні амплітуди коливань, але за великих амплітуд (більше 2,5 мм) значно зростають інерційні параметри приводу. Це може призводити до виникнення паразитних коливань та швидкого зношування елементів приводу.
3. Зростання максимального тиску при зменшенні діаметра насадка має різні наслідки: з однієї сторони зростання максимального тиску, що призводить до руйнування мікробів, а з іншої – зменшення витoku рідини крізь насадок, що призводить до падіння продуктивності процесу.
4. Дослідження по візуалізації процесу зворотно-поступального протікання рідини крізь насадок показали, що вже при незначних максимальних тисках проявляється ефект появи кавітаційних каверн, кавітаційного росту та сплескування газових пухирців повітря, яке розчинено у воді.
5. Виходячи з вище сказаного є необхідність провести експериментальні дослідження з вимірювання дійсного максимального тиску в обладнанні та встановлення оптимальних параметрів приводу: частоти та амплітуди коливань, розмірів поршня та насадка їх співвідношення.

Література

1. Сілін Р.І. Кавітаційна обробка та її вплив на склад води / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв, В.В. Третько, І.І. Сорока // Вісник Технологічного університету Поділля. – 2002. – № 3. – С. 253–257.
2. Сілін Р.І. Науково-технічні основи розроблення вібр машин для впливу на властивості води / Р.І. Сілін, А.І. Гордєєв // Вібрації в техніці та технологіях. – 2009. – № 4(56) – С. 141–148.
3. Вітенько Т.М. Гідродинамічна кавітація у масообмінних хімічних і біологічних процесах : монографія / Т.М. Вітенько. – Тернопіль, 2009. – 224 с.
4. Шевчук Л.І. Вібраційний електромагнітний кавітатор резонансної дії / Л.І. Шевчук, І.С. Афтаназів, О.І. Строган // Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні : український міжвід. наук.-техн. зб. Нац. ун-ту «Львівська політехніка». – 2011. – Вип. 45. – С. 374–380.
5. Низькочастотні віброрезонансні кавітатори : монографія / [Л.І. Шевчук, І.С. Афтаназів, О.І. Строган, В.Л. Старчевський]. – Львів : Видавництво Львівської політехніки. 2013. – 173 с.
6. Пат. на корисну модель № 101525 України. МПК B01F 3/00. Гідродинамічний струменевий кавітатор / Яворський В.Т., Сухачький Ю.В., Мних Р.В., Оленіч Р.Р., Курилець О.Г. ; Національний університет «Львівська політехніка». – № u 2015 01762 ; заяв. 27.02.2015 ; опубл. 25.09.2015, Бюл. № 18. – 3 с.
7. Сілін Р.І. Властивості води та сучасні способи її очищення : монографія / Р.І. Сілін, Б.А. Баран, А.І. Гордєєв. – Хмельницький : ХНУ, 2009. – 254 с., ил.
8. Патент на корисну модель № 94358 України, МПК B01F 5/00. Вібраційний кавітатор поршневого типу для активації рідини та її знезаражування / Сілін Р.С., Гордєєв А.І., Копицький О.А. (Україна) ; заявник і патентовласник Хмельницький нац. ун-т. – u 2014 05860 ; заяв. 30.05.2014 ; опубл. 10.11.2014. Бюл. № 21. – 4 с.
9. Пат. на корисну модель 116031 України, МПК C02F 9/00. Пристрій для гідрокавітаційного знезаражування води / Сілін Р.І., Гордєєв А.І., Гордєєв О.А. Мігаль В.Г. Ганзюк А.Л. (Україна) ; заявник і патентовласник Хмельницький нац. ун-т. – u 2016 10060 ; заяв. 03.10.2016 ; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9. – 4 с.
10. Пат. на корисну модель № 126495 України. МПК C02F 1/00. Вібраційна машина для знезаражування водних середовищ / А.І. Гордєєв, Н.О. Костюк. – № u 2018 10090 ; заяв. 02.01.2018 ; опубл. 25.08.2018, Бюл. № 12. – 6 с.
11. Альтшуль А.Д. Гидравлика и аэродинамика (основы механики жидкости) / А.Д. Альтшуль, П.Г. Киселев. – М. : Издательство литературы по строительству, 1965. – 274 с., ил.
12. Попов Д.Н. Нестационарные гидромеханические процессы / Д.Н. Попов. – М. : Машиностроение, 1982. – 240 с., ил.

References

1. Silin R.I., Hordeev A.I., V.V. Tretko V.V., Soroka I.I. Cavitation treatment and its effect on water composition. Bulletin of Technology University of Podillia. № 3. 2002. pp. 253–257.
2. Silin R.I., Hordeev A.I. Scientific and technical bases of development of vibration machines for influence on water properties. Vibrations in Engineering and Technology. 2009. No. 4 (56) pp. 141–148.
3. Vitenko T.M. Hydrodynamic cavitation in mass-exchange chemical and biological processes: monograph. Ternopil, 2009. 224 p.
4. Shevchuk L.I., Aftanaziv I.S., Strogan O.I. Vibrating electromagnetic cavitator of resonant action. Automation of production processes in mechanical engineering and instrumentation. Ukrainian Intermediate. scientific-technical Sat. Nat. University of Lviv Polytechnic. No. 45. 2011. pp. 374–380.
5. Shevchuk L.I., Aftanaziv I.S., Strogan O.I., Starchevsky V.L. Low-frequency vibration resonance cavitators: a monograph. Lviv: Publishing house of Lviv Polytechnic. 2013. 173 p.
6. Pat. for utility model № 101525 of Ukraine. IPC B01F 3/00. Hydrodynamic Inkjet Cavitator. Yavorsky V.T., Suhatsky Y.V., Mnykh R.V., Olenich R.R., Kurilets O.G. Lviv Polytechnic National University; № in 2015 01762; applications 27.02.2015; publ. 9/25/2015, Bul. № 18. 3 p.
7. Silin R.I., Baran B.A., Hordeev A.I. Water properties and modern methods of its purification: monograph. Khmelnytsky: KhNU, 2009. 254 p.
8. Patent for utility model. No. 94358 of Ukraine, IPC B01F 5/00. Piston type vibrating cavitator for fluid activation and decontamination. Silin R.S, Hordeev A.I., Kopytskyak O.A. (Ukraine); applicant and patentee Khmelnytsky Nat. Univ. in 2014 05860; Statement 05/30/2014 Posted on 10/11/2014. Bul. № 21. 4 p.
9. Pat. for utility model 116031 of Ukraine, IPC C02F 9/00. Device for hydrocavitation water disinfection. Silin R.I., Hordeev A.I., Hordeev O.A. Migal V.G. Ganzuk A.L. (Ukraine); applicant and patentee Khmelnytsky Nat. Univ. in 2016 10060; Statement 03.10.2016; Publ. 10/05/2017, Bul. № 9. 4 p.
10. Pat. for utility model №126495 of Ukraine. IPC C02F 1/00. Vibrating machine for decontamination of aquatic environments / A.I. Hordeev, N.O. Kostyuk; No. in 2018 10090; applications 02.01.2018; publ. 08/28/2018, Bul. № 12. 6 s.
11. Altshul A.D., Kiselev P.G. Hydraulics and aerodynamics (fundamentals of fluid mechanics). M.: Publishing House of Literature on Construction, 1965. 274 p.
12. Popov D.N. Non-stationary hydromechanical processes. M.: Mechanical Engineering, 1982. 240 p.

Рецензія/Peer review: 11.12.2019 Надрукована/Printed: 12.01.2020

Рецензент: д.т.н., проф. Харжевський В.О.