

ДУШЕНКО ОЛЕКСАНДР

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0009-0000-3588-6874>

ТКАЧУК ВІТАЛІЙ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-0640-2740>e-mail: [tkachukvi@khmmu.edu.ua](mailto:tkachukvi@khmmu.edu.ua)

## ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОДУКТИВНОСТІ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ ЗМІНИ СКЛАДУ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДИ ДЛЯ ТЕПЛОМЕРЕЖ

Не якісна водопідготовка для котлів, та забруднення, що присутні в неочищеній воді, призводять до цілого ряду проблем: великі колоїдні та механічні забруднення у вигляді накипу, іржі, глини або піску швидко забивають труби, значно зменшуючи їх внутрішній діаметр. Це призводить до виходу з ладу запірної арматури та насосного обладнання: солі жорсткості та інші важкорозчинні солі (карбонати, сульфати магнію та кальцію, силікати, різні сполуки міді та марганцю) осідають, утворюючи кірку на металевих стінках обладнання, що зменшує його тепловіддачу. Суть роботи запропонованого обладнання полягає в тому, що вплив гідрокавітації та змінного магнітного поля на воду зводиться до єдиного процесу – розщепленню молекул води у кавітаційній порожнині на активні радикали. Запропоновано конструкцію вібраційної машини з гідрокавітаційним впливом на воду при зворотно-поступальному руху рідини крізь насадок, що підвищує сумарний ефект розриву водневих зв'язків у молекулах води, окисленню іонів заліза та кальцію, збільшення показника Рн.

**Ключові слова:** продуктивність, вібраційна машина, гідрокавітація, параметри роботи приводу.

DUSHENKO OLEKSANDR, TKACHUK VITALIY

Khmelnitskyi National University

## APPLICATION OF A VIBRATING MACHINE FOR RECEIVING AMMONIA WATER FOR PLANT FEEDING

Inadequate water treatment for boilers and impurities present in untreated water lead to a number of problems: large colloidal and mechanical impurities in the form of scale, rust, clay or sand quickly clog pipes, significantly reducing their internal diameter. Based on the analysis of recent studies, it is proposed to improve the quality and composition of water that comes from municipal water supply, artesian wells and reservoirs, before filtering and deaeration of water, it is proposed to pre-treat it with hydrocavitation and a magnetic field in order to soften and change its properties. This leads to the failure of shut-off valves and pumping equipment: hardness salts and other poorly soluble salts (carbonates, sulfates of magnesium and calcium, silicates, various compounds of copper and manganese) settle, forming a crust on the metal walls of the equipment, which reduces its heat output. This contributes to a reduction in boiler power, an increase in electricity costs, and significantly shortens the service life of the equipment. The essence of the proposed equipment is that the effect of hydrocavitation and a variable magnetic field on water is reduced to a single process - the splitting of water molecules in the cavitation cavity into active radicals. The essence of the process of hydrocavitation on the course of chemical reactions, the breaking of hydrogen bonds in water molecules is considered. The design of a vibrating machine with an additional hydrocavitation effect on water during the reciprocating movement of the liquid through the nozzle is proposed, which increases the total effect of breaking hydrogen bonds in water molecules, oxidizing iron and calcium ions, increasing the pH value, and after settling, it enters the ion exchange and deaeration plant, and later to the heating network.

**Key words:** productivity, vibration machine, hydrocavitation, drive parameters.

### Постановка проблеми

Термін служби котельних установок значною мірою залежить від фізико-хімічних властивостей води. Низька якість води, а також відсутність необхідного контролю та хімічної корекції води в тепловій мережі, паро- та конденсатопроводах і котлах можуть призвести до утворення накипу, кисневої та вуглекислотної корозії. Це призводить до зниження тепловіддачі, засмічення обладнання, скорочення терміну служби, зниження рентабельності та завантаження, а також збільшення часу простою.

Вода з високим вмістом розчинених забруднень, тобто солей жорсткості, таких як солі кальцію і магнію, є найбільш небезпечною для котельного обладнання. Одна з властивостей солей визначається їх здатністю осідати на внутрішніх поверхнях обладнання та утворювати шар накипу. Як наслідок, накип знижує теплопровідність металу і вимагає значного збільшення енергоспоживання для досягнення бажаної продуктивності котельні. Наразі єдиним ефективним способом запобігання утворенню накипу є попереднє очищення води від розчинених у ній домішок.

Водопідготовка котельні – це процес попередньої обробки води перед її подачею в котел нагрівання теплової мережі. Система попереднього очищення води повинна містити кілька фільтрів, які видаляють з води як розчинені забруднення, такі як мінеральні солі, так і грубі механічні домішки.

Перший етап водопідготовки не є особливо складним, і зазвичай використовуються стандартні фізичні методи водопідготовки, такі як механічна фільтрація. Складніші справи з другим етапом водопідготовки, оскільки при його виконанні необхідно видалити розчинені мінеральні солі. В даний час найбільш ефективний і надійний метод тонкої очистки води для котельні полягає в застосуванні мембранних технологій – зворотний осмос та ультрафільтрація. Етапи водопідготовки в котельнях, як правило, такі: видалення колоїдів, завислих речовин, заліза та органічних речовин; демінералізація або пом'якшення води; видалення агресивних газів CO<sub>2</sub> та O<sub>2</sub>; коригувальна обробка.

Джерелами водопостачання для котелень є міський водопровід, штучні свердловини та водосховища. Водопровідна вода, як правило, направляється на систему водопідготовки і подається в теплову мережу та котли без будь-якої попередньої обробки. Якщо водопровідна вода хлорована, її необхідно повністю дехлорувати при використанні зворотного осмосу або хімічного опріснення, оскільки хлор руйнує аніони і мембрани зворотного осмосу. Вода з підземних джерел зазвичай містить високий рівень іонів заліза, які також можуть бути присутніми у водопровідній воді внаслідок корозії труб. Високі концентрації іонів заліза сприяють зростанню відкладень на мембрані, що призводить до більш частого очищення кислотою і скорочення терміну служби мембрани. Органічні речовини та суспензії у живильній воді котла можуть викликати корозію та відкладення на трубопроводах і поверхнях нагрівача. Крім того, органічні речовини знижують незворотну обмінну здатність аніонів, що призводить до деградації та забруднення мембран зворотного осмосу.

Отже, покращення характеристик постачання води для котелень є важливим завданням, а обґрунтування параметрів продуктивності вібраційної машини зміни складу та властивостей води для тепломереж, з метою підвищення ефективності кавітаційної підготовки, є перспективним напрямом досліджень.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останніми роками наукова спільнота зацікавилася технологією гідродинамічної кавітації (ГК) у водопідготовці: при ГК вода пропускається через перфоровані пластини або трубки Вентурі, де утворюються мікро- та нанобульбашки водяної пари низького тиску [1]. Утворення, ріст і бурхливий колапс бульбашок призводять до вивільнення численних енергетичних «гарячих точок», ударних хвиль і мікроструменів, які можуть розщеплювати або дезінтегрувати органічні речовини, присутні в рідині. Крім того, високореактивні гідроксильні радикали (ОН<sup>-</sup>), що утворюються під час ГК, можуть розкласти широкий спектр стійких забруднювачів [2]. Ефективність ГК посилюється іншими процесами, такими як аерація, окиснення, Фентон [3-5], ультразвук [6], ультрафіолет [7], озон [8] і плазма [9] і посилюється при їх комбінуванні. Переваги ГК включають просту конструкцію, низьку вартість, високу енергоефективність і легку масштабованість [4,10,11]. Одним з перспективних нетрадиційних методів є гідродинамічна кавітація, яка до цього часу була пов'язана лише з інженерними проблемами, такими як шум, вібрація та кавітаційна ерозія (показник зниження ефективності машини). Однак в останнє десятиліття ГК стала реальним методом очищення стічних вод завдяки ефективному руйнуванню складних органічних хімічних речовин, нехімічної природі, хорошій сумісності з іншими передовими процесами окислення, простоті експлуатації, відмінному створенню необхідної сили кавітації, застосуванню в пілотному масштабі, хорошими експериментальними результатами та економічними аспектами широко визнано в роботах [12-14]. Як приклад конструкції кавітаційного обладнання наведено схему гідродинамічного кавітаційного реактора на рис. 1 [15].

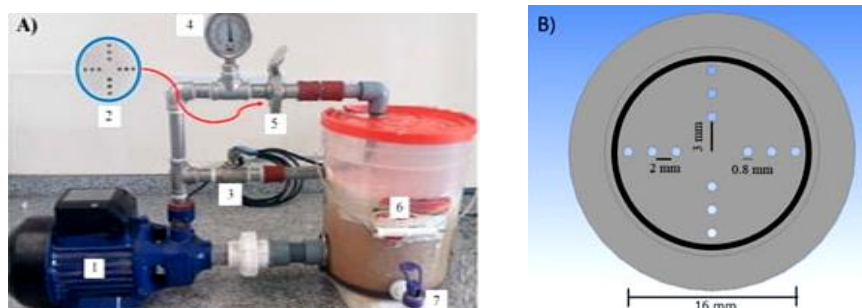
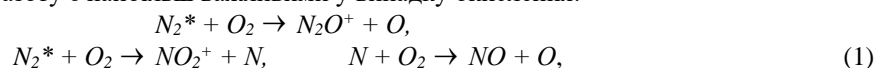


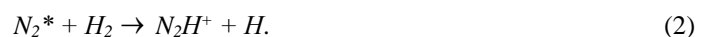
Рис. 1. Схема експериментальної установки гідродинамічного кавітаційного реактора (А) і кавітаційного пристрою – діафрагми (В). (А): 1 – насос, 2 – кавітаційний пристрій (діафрагма), 3 – клапан в байпасній лінії, 4 – манометр, 5 – зона кавітації, 6 – рециркуляційний бак, 7 – точка відбору води

Вплив кавітаційного звукового поля на матеріали, що потрапляють в кавітаційну порожнину, є прямим, причому активні гази O<sub>2</sub> і H<sub>2</sub> діють на реакції радикального перетворення, а N<sub>2</sub> – на газову звукохімію, кінцевим результатом якої є фіксація азоту. Коли кавітаційна бульбашка лопається, в розчин переходять іони H<sup>+</sup>, OH<sup>-</sup>, низькоенергетичні електрони, що утворюються в газовій фазі при розщепленні молекули H<sub>2</sub>O, а також метастабільні збуджені молекули H<sub>2</sub>O.

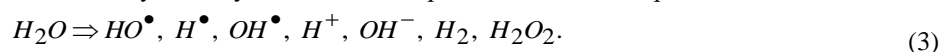
Газофазні реакції за участю азоту в основному зумовлені реакцією збуджених молекул N<sub>2</sub>\* [4]. Тому реакції за участю іонів та атомів азоту є найбільш важливими у випадку окислення:



а у випадку відновлення:



В цілому сутність процесу полягає в тому, що вплив гідрокавітації на водні розчини зводиться до єдиного процесу – розщепленню молекул води у кавітаційній порожнині на активні радикали:



За останні роки з'явилося багато досліджень застосування кавітаційних процесів та обладнання для проведення звукохімічних реакцій у воді [16,17]. Значний вплив на зміну властивостей вод та її склад дає циклічна гідрокавітація у вібраційних машинах при зворотньо-поступальному руху рідини крізь насадок [32-34].

**Актуальність дослідження**

Метою цієї роботи є обґрунтування продуктивності вібраційної машини зміни складу та властивостей води для тепломереж від впливу режимів роботи приводу та конструктивних взаємозв'язків із завданням підвищення ефективності кавітаційної підготовки води для котельень, а кінцеве – зменшення утворення накипу, кисневої та вуглекислотної корозії в теплових мережах.

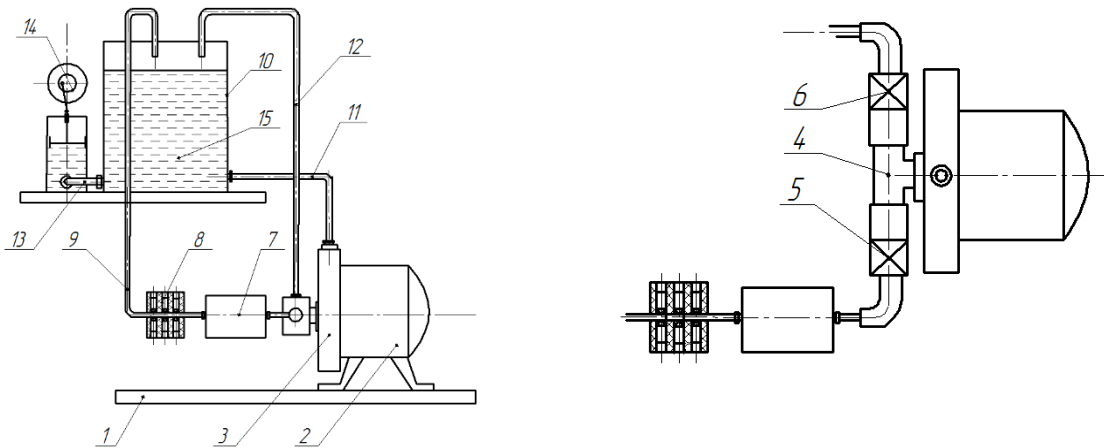
**Виклад основного матеріалу**

Виходячи з аналізу останніх досліджень запропоновано для підвищення якості та складу води, яка поступає з муніципального водопостачання, артезіанських свердловин і водойм, перед фільтруванням та деаерацією води проводити попередньо її оброблення гідрокавітацією з метою пом'якшення та зміни її властивостей.

Сутність роботи запропонованого обладнання полягає в тому, що вплив звукової гідрокавітації та змінного за напрямом магнітного поля на воду зводиться до єдиного процесу – розщепленню молекул води у кавітаційній порожнині на активні радикали (рис. 2).

Виходячи з аналізу попередніх досліджень, патентного обзору способів та конструкцій пристроїв для очищення, пом'якшення і зміни властивостей води було запропоновано поєднати можливості гідрокавітаційної обробки води, а саме статичним та гідродинамічним кавітаційним впливом на воду для котельень і створити технологічне обладнання для попередньої її підготовки.

Принципова схема обладнання магнітно-кавітаційної підготовки води для тепломереж представлена на схемах рис. 2. У конструкції обладнання поєднано кавітаційний і магнітний вплив на воду та зворотньо-поступальний рух рідини крізь насадок із виникнення кавітаційного процесу у поршневій вібраційній машині ексцентрикового типу ( рис. 2 поз. 14 та рис. 3).



**Рис. 2 – Принципова схема обладнання вхідної магнітно-кавітаційної підготовки води для тепломереж: 1 – основа; 2 – електродвигун; 3 – насос; 4 – трійник; 5, 6 – крани кулькові; 7 – статичний кавітатор; 8 – блок постійних магнітів; 9 – трубопровід; 10 – бак; 11 – трубопровід; 12 – трубопровід; 13 – трубопровід; 14 – поршнева вібраційна машина ексцентрикового типу; 15 – вода**

В обладнанні застосовано статичний кавітатор (поз. 7 рис. 2) та вібраційна машина (поз. 14 рис. 2). Розглянемо роботу вібраційної машини для здійснення кавітаційного впливу на властивості води та зміни її солового складу. Працює вібраційна машина наступним чином: у бак заливається вода, відкривається кран випуску повітря і вода заливається у циліндричну камеру пульсації вібраційної машини, кран закривається. Включається електродвигун і ексцентриковий вібратор приводить зворотньо-поступальний рух поршень.

При ході поршня вниз рідина стискається та виштовхується у бак, а при ході вверх рідина втягується у камеру пульсації. Після проведення оброблення кавітацією вода зливається у накопичувальний бак відстою.

З попередніх досліджень [17,19] відомо, що продуктивність вібраційної машини залежить від тиску який виникає у камері пульсації та величині тиску з насадка  $d$ , а також від режимів роботи вібраційного приводу амплітуди і частоти та від співвідношення конструктивних параметрів та є функцією цих параметрів за часом.

$$Q = Ft(\Delta P; \frac{d^2}{D^2}; A; f; P), \tag{3}$$

де  $Q$  – продуктивність;

$\Delta P$  – зміна тиску у камері пульсації;

$\frac{d^2}{D^2}$  – співвідношення діаметру насадка та діаметра камери пульсації;

$A$  – амплітуда коливання поршня;

$f$  – частота коливання поршня;

$P$  – тиск струменя з насадка.

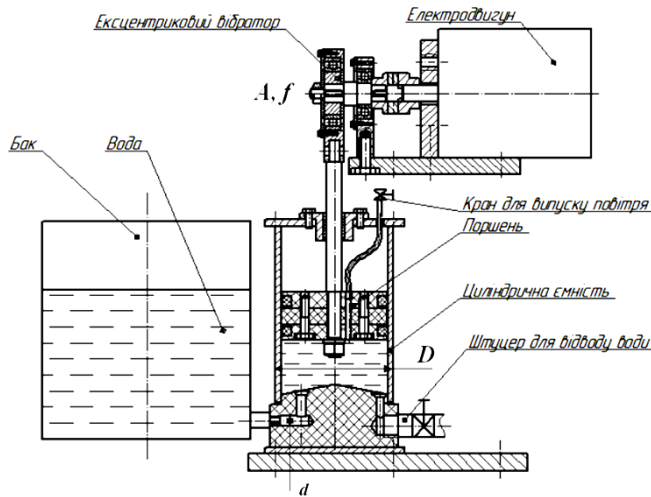


Рис. 3 – Принципова схема вібраційної машини кавітаційної підготовки води для тепломереж: А – амплітуда коливань приводу; f – частота коливань приводу; D – діаметр камери пульсації; d – діаметр насадку

Для схеми вібраційної машини кавітаційної підготовки води для тепломереж побудуємо аналітичну модель у момент стиску ідеальної рідини (ходу поршня вниз), яка описується рівнянням:

$$m\ddot{x} + k\dot{x} + cx = F \tag{4}$$

де  $\ddot{x} = \frac{\varepsilon D_k^2 \cdot A_k \cdot f^2}{d_n^2}$  – прискорення рухомих частин та приєднаної маси рідини;

$\dot{x} = \frac{\varepsilon D_k^2 \cdot A_k \cdot f^2}{d_n^2}$  – прискорення рухомих частин та приєднаної маси рідини;

$\dot{x} = \frac{\varepsilon D_k^2 \cdot A_k \cdot f}{d_n^2}$  – швидкість руху рідини;

$x = 2A_k$  – величина переміщення поршня;

$F$  – сила яка діє на поршень,  $F = \Delta P \frac{\pi D_k^2}{4}$ ;

$C$  – швидкість розповсюдження ударної хвилі (1350 м/с.);

$m$  – маса поршня зі штоком;

$k$  – демпфуюча здатність поршня з рідиною та отвором  $k = \frac{8\pi \cdot D_k^4 \cdot \eta \cdot l}{d_n^2 \cdot N}$ ,

де  $\eta$  – динамічний коефіцієнт в'язкості,  $\eta = 0,898$  МПа/с;

$l$  – довжина отвору,  $l = 0,05$ м;

$N$  – кількість отворів,  $N = 1$ ;

$\varepsilon$  – коефіцієнт звуження потоку у насадку,  $\varepsilon = 0,8$

Провівши підстановку у ф. 4 відповідних значень отримаємо наступну залежність:

$$\frac{\varepsilon D_k^2 A_k}{d_n^2} m f^2 + k \frac{\varepsilon D_k^2 A_k}{d_n^2} f + c \cdot 2A_k = \Delta P \frac{\pi D_k^2}{4} \tag{5}$$

Провівши перетворення отримаємо залежність тиску у камері пульсації від параметрів приводу та інших конструктивних параметрів:

$$\frac{4\varepsilon A_k}{\pi d_n^2} m f^2 + k \frac{4\varepsilon A_k}{\pi d_n^2} f + c \frac{8A_k}{\pi D_k^2} = \Delta P \tag{6}$$

Проведено розрахунок  $\Delta P$  при зміні частоти коливань та різних діаметрів насадку за допомогою MathCad та побудовано залежності які представлені на рис. 4.

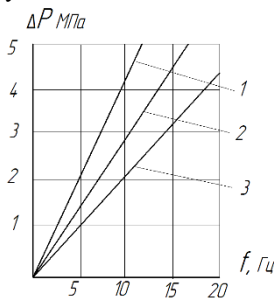


Рис. 4 – Графік зміни розрахункового тиску у камері пульсації від частоти при різних діаметрах насадку: 1 – 6 мм; 2 – 10 мм; 3 – 12 мм при амплітуді коливань А = 2мм

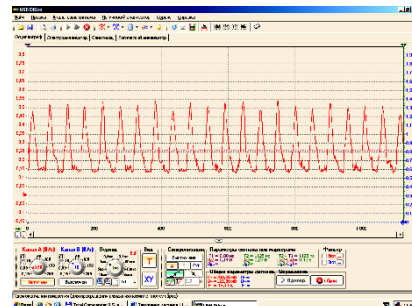


Рис. 5 – Скріншот осцилограми з екрана монітора зміни тиску у камері пульсації

Було проведено експериментальне дослідження зміни тиску  $\Delta P$  в камері пульсації для реальної рідини від різних параметрів за допомогою датчика тиску МРМ489 та USB осцилографа ВМ8020 з фіксацією

результатів на персональному комп'ютері із застосуванням програмного продукту «DiSco» (рис. 5). Оброблені результати представлені на рис. 6.

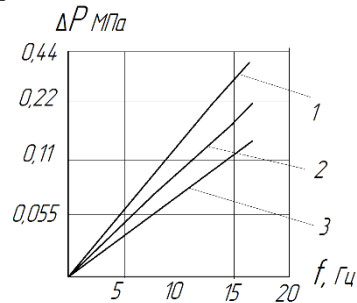


Рис. 6 – Результати експериментального визначення зміни тиску у камері пульсації від частоти при різних діаметрах насадка: 1 – 6 мм; 2 – 10 мм; 3 – 12 мм при амплітуді коливань A = 2 мм

Провівши порівняння значень тиску для ідеальної рідини (рис. 4) із значеннями тиску для реальної рідини (рис. 6) встановлено розбіжність результатів. Можливо, у рівнянні (4) було не коректно закладено припущення, а саме, що швидкість розповсюдження ударної хвилі можливо залежить від швидкості зростання тиску при коливанні поршня та неможливість врахування виникнення рою кавітаційних пухирців. Тому для практичного користування у розрахунках при проектуванні вібраційних машин введемо поправочний коефіцієнт  $\delta = 0,04 - 0,07$ .

$$\frac{4\epsilon A_k}{\pi d_H^2} m f^2 + k \frac{4\epsilon A_k}{\pi d_H^2} f + c \frac{8A_k}{\pi D_k^2} = \delta \Delta P, \quad (7)$$

де  $\delta$  – поправочний коефіцієнт.

Об'єм для ідеальної рідини, що виштовхується з насадка визначається за формулою:

$$U = 2A_k \frac{\pi D_k^2}{4} \quad (8)$$

Але для реальної рідини, при ході уверх поршня, рідина проходить скрізь насадок з виникненням кавітаційних процесів, у камері пульсації і виникає її розрив з утворенням кавітаційних пухирців, які у свою чергу зменшують об'єм рідини, який втягується у камеру пульсації і відповідно при стисканні такої суміші проходить сплескування пухирців і витискається менший об'єм рідини, що призводить до зменшення продуктивності роботи вібраційної машини.

Для визначення динамічного напору P струменя для реальної рідини з насадка було застосовано мембранний датчик тиску, розташований на зрізі насадка на відстані 10 мм та підключений до апаратури, яка реєструє зміну величини тиску струменя від частоти у вигляді осцилограми (рис. 7).

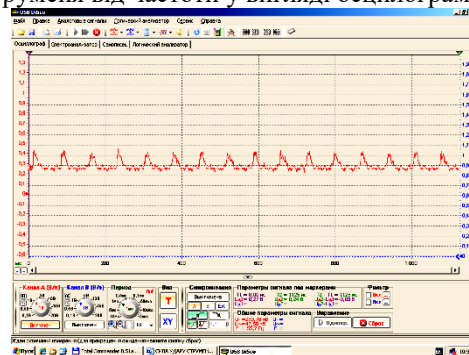


Рис. 7 – Скріншот осцилограми з екрана монітора по вимірюванню величини тиску струменя з насадка

Були проведені дослідження по визначенню залежності динамічного напору струменя від амплітуди коливань приводу. Встановлено, що збільшення амплітуди вище 2 мм призводить до значних динамічних коливань самої установки тому було прийнята для подальших досліджень амплітуда A = 2 мм. Експериментально отримані залежності величини максимального динамічного напору струменю з отвору від діаметру насадка при зміні частоти представлені на рис. 8.

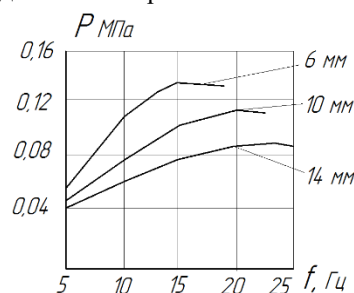


Рис. 8 – Графік залежності величини максимального динамічного напору струменю з отвору від діаметру насадка при зміні частоти f при ході поршня униз: при амплітуді коливань приводу A = 2 мм; D<sub>H</sub> = 100 мм

З результатів дослідження, приведених на рис.7, встановлено, що найбільший динамічний напір струменя досягається при діаметрі насадка 6 мм та частоті 15 Гц. Але більш оптимальним рішенням було прийнято застосовувати діаметр насадка 10 мм тому, що при незначному зниженні тиску (а також швидкості), частота проходження рідини крізь насадок збільшується до 20 Гц. Збільшення частоти при незначному зниженні динамічного напору струменя напряму впливає на збільшення продуктивності кавітаційного оброблення рідини.

Провівши дослідження по вимірюванню величини динамічного напору з насадка при різних частотах коливання поршня встановлено, що із збільшення частоти коливань величина динамічного напору струменя з насадка має нелінійний характер в наслідок виникнення у камері пульсації кавітаційних пухирців (зі зміною їх розмірів від частоти пульсації), які у свою чергу зменшують об'єм рідини, який втягується у камеру пульсації і відповідно при стисканні такої суміші проходить сплескування пухирців і витискається менший об'єм рідини з меншою швидкістю і відповідно з меншим тиском, що призводить до зменшення продуктивності роботи вібраційної машини.

Для визначення границь оптимальної продуктивності вібраційної машини було проведено дослідження візуального спостереження картини руху рідини крізь насадок та її поведінки у камері пульсації за допомогою швидкісної відеоз'ємки (рис. 9).

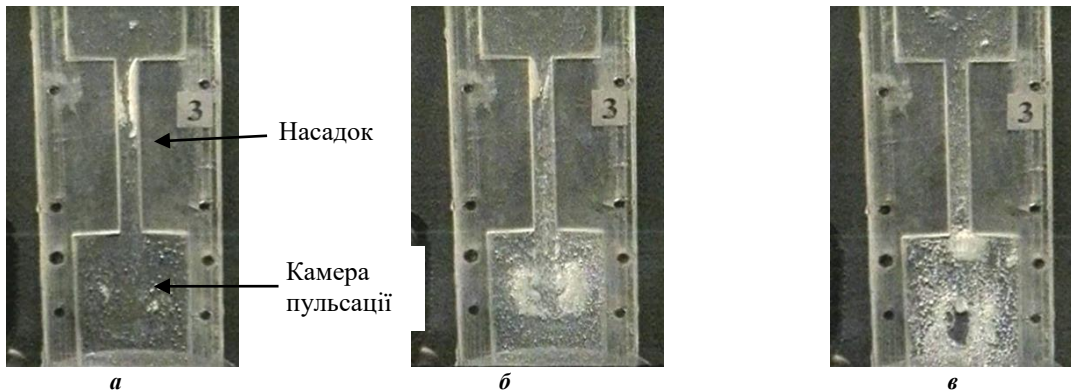


Рис. 9 – Скріншоти проходження рідини крізь насадок у камеру пульсації при різних частотах коливань віброприводу: а – частота 5 Гц; б – частота 15 Гц; в – частота 23 Гц

Я видно з скріншотів (рис. 9) при частоті коливань приводу 5 Гц у насадку виникає кавітаційна каверна, а у камері пульсації зароджуються кавітаційні пухирці. При збільшенні частоти коливань до 15 Гц утворюється рій кавітаційних пухирців зі зривом каверни, а при частоті 23 Гц виникає великий деформований пухирець. Це пояснює залежність зміни максимального тиску з насадка, які показані на рис. 8 і відповідно зміни величини об'єму, що виштовхується з меншою швидкістю.

Процеси, що відбуваються всередині обладнання при кавітаційній обробці води, зводяться до утворення нерозчинних у воді карбонатів  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$ , оксикарбонатів  $\text{Mg}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$  і гідроксидів  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , які з часом утворюються і випадають в осад, зменшуючи таким чином загальну концентрацію розчинених речовин. Під час обробки підвищується рН, розриваються водневі зв'язки молекул води і зменшується коефіцієнт поверхневого натягу [18].

Проведено дослідження зміни рН після проведення кавітаційної обробки води у вібраційній машині. Результати досліджень показали збільшення показника рН з 7,4 до 8,3 од., що говорить про покращення характеристик води (рис. 10).

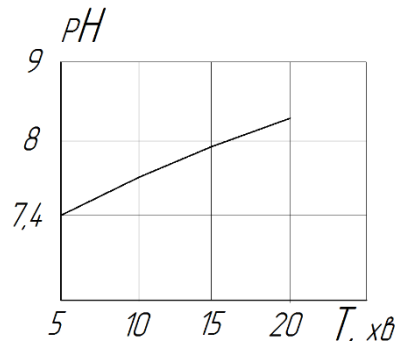


Рис. 10 – Графік зміни показника рН після оброблення кавітацією водопровідної води у вібраційній машині з часом: при амплітуді  $A = 2$  мм; діаметрі поршня  $D_n = 100$  мм та діаметрі насадка  $d = 10$  мм; частоті коливань приводу 20 Гц

Для запропонованих режимів роботи приводу та прийнятих конструктивних розмірів визначено максимальну продуктивність вібраційної машини для зміни складу та властивостей води при наступних параметрах, що отримані при дослідженнях за умови виштовхування об'єму рідини за одиницю часу (година):

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} 2A \cdot f \cdot 3600 = \frac{3,14 \cdot 0,1^2}{2} 0,002 \cdot 20 \cdot 3600 = 2,26 \frac{\text{м}^3}{200} \quad (9)$$

Застосування запропонованого обладнання попередньої кавітаційної підготовки дає можливість знизити навантаження на блоки очищення, іонного обміну, деаерація води, та підвищити якість водопідготовки, осідання на металевих стінках обладнання кірку, що знижує його тепловіддачу, дозволяє виключити ймовірність аварій і виходу обладнання з ладу через утворення накипу.

#### Висновки

Запропоновано конструкцію обладнання магнітно-кавітаційної підготовки води з додатковим гідрокавітаційним впливом на воду при зворотно-поступальному руху рідини крізь насадок у вібраційній машині, що поєднує сумарно ефекти розриву водневих зв'язків у молекулах води, окисленню іонів заліза та кальцію, збільшення показника Рн.

Побудовано аналітичну модель для визначення тиску у камері пульсації у момент стиску ідеальної рідини при ході поршня униз. Аналітично та експериментально досліджено зміну тиску у камері пульсації від частоти при різних діаметрах насадка. Рекомендовано застосовувати діаметр насадка 10 мм при діаметрі камери пульсації 100 мм.

У результаті проведених досліджень із застосуванням швидкісної відеоз'ємки встановлено частотні границі режимів роботи вібраційної машини та амплітуди коливань поршня. Також у результаті проведення експериментальних досліджень встановлено, що оптимальна продуктивність вібраційної машини зміни властивостей води знаходиться при наступних параметрах роботи приводу та конструктивних співвідношеннях: частота коливань приводу 19-21 Гц при амплітуді  $A = 2$  мм; діаметрі поршня  $D_{\text{п}} = 100$  мм та діаметрі насадка 10 мм.

Для запропонованих режимів роботи приводу та прийнятих конструктивних розмірів визначено максимальну продуктивність вібраційної машини для зміни складу та властивостей води за умови виштовхування об'єму рідини за одиницю часу.

#### Література

1. Gogate P. R., Pandit A. B. A Review and Assessment of Hydrodynamic Cavitation as a Technology for the Future. *Ultrason. Sonochem.* 2005, 12, pp. 21–27.
2. Badmus K. O., Irakoze N., Adeniyi O. R., Petrik, L. Synergistic Advance Fenton Oxidation and Hydrodynamic Cavitation Treatment of Persistent Organic Dyes in Textile Wastewater. *J. Environ. Chem. Eng.* 2020, 8, 103521.
3. Thanekar P., Panda M., Gogate P. R. Degradation of Carbamazepine Using Hydrodynamic Cavitation Combined with Advanced Oxidation Processes. *Ultrason. Sonochem.* 2018, 40, pp. 567–576.
4. Joshi S. M., Gogate P. R. Intensification of Industrial Wastewater Treatment Using Hydrodynamic Cavitation Combined with Advanced Oxidation at Operating Capacity of 70 L. *Ultrason. Sonochem.* 2019, 52, pp. 375–381.
5. Thanekar P., Gogate P. R., Znak Z., Sukhatskiy Y., Mnykh R. Degradation of Benzene Present in Wastewater Using Hydrodynamic Cavitation in Combination with Air. *Ultrason. Sonochem.* 2021, 70, 105296.
6. Yi C., Lu Q., Wang Y., Wang Y., Yang B. Degradation of Organic Wastewater by Hydrodynamic Cavitation Combined with Acoustic Cavitation. *Ultrason. Sonochem.* 2018, 43, pp. 156–165.
7. Kovačič A., Škufca, D., Zupanc M., Gostiša J., Bizjan, B., Krištofelc N., Dolenc M.S., Heath E. The Removal of Bisphenols and Other Contaminants of Emerging Concern by Hydrodynamic Cavitation: From Lab-Scale to Pilot-Scale. *Sci. Total Environ.* 2020, 743, 140724.
8. Wang J., Chen H., Yuan R., Wang F., Ma F., Zhou B. Intensified Degradation of Textile Wastewater Using a Novel Treatment of Hydrodynamic Cavitation with the Combination of Ozone. *J. Environ. Chem. Eng.* 2020, 8, 103959.
9. Abramov V. O., Abramova A. V., Cravotto, G., Nikonov, R.V., Fedulov, I.S., Ivanov V. K. Flow-Mode Water Treatment under Simultaneous Hydrodynamic Cavitation and Plasma. *Ultrason. Sonochem.* 2021, 70, 105323.
10. Wang B., Su H., Zhang B. Hydrodynamic Cavitation as a Promising Route for Wastewater Treatment A Review. *Chem. Eng. J.* 2021, 412, 128685.
11. Terán H. R., Medeiros, D. R., Sánchez M. S.; Aline P. C. de Sousa Júnior R., da Silva S. S., Santos J. C. Hydrodynamic Cavitation-Assisted Continuous Pre-Treatment of Sugarcane Bagasse for Ethanol Production: Effects of Geometric Parameters of the Cavitation Device. *Ultrason. Sonochem.* 2020, 63, 104931.
12. Gałol M., Przyjazny A., Boczkaj G. Wastewater Treatment by Means of Advanced Oxidation Processes Based on Cavitation—A Review. *Chem. Eng. J.* 2018, 338, pp. 599–627.
13. Gogate P. R. Cavitation: An Auxiliary Technique in Wastewater Treatment Schemes. *Adv. Environ. Res.* 2002, 6, pp. 335–358.
14. Thanekar P., Lakshmi N. J., Shah M., Gogate P. R., Znak Z., Sukhatskiy Y., Mnykh R. Degradation of Dimethoate Using Combined Approaches Based on Hydrodynamic Cavitation and Advanced Oxidation Processes. *Process Saf. Environ. Prot.* 2020, 143, pp. 222–230.
15. Fabio P. Sánchez Vera Gilberto J. Colina Andrade Kevin, Tejada Meza, Jaime Cárdenas García, David Alfredo, Pacheco Tanaka. Continuous Cultivation of Microalgae in Cattle Slaughterhouse Wastewater Treated with Hydrodynamic Cavitation. *Water.* 2022, 14(8), 1288; <https://doi.org/10.3390/w14081288>.

16. Petkovšek M., Mlakar M., Levstek M., Stražar M., Širok B., Dular M. A Novel Rotation Generator of Hydrodynamic Cavitation for Waste-Activated Sludge Disintegration. *Ultrason. Sonochem.* 2015, 26, pp. 408–414.
17. Sun X., You W. B., Xuan X. X., Ji L., Xu X., Wang G. C., Zhao S., Boczkaj G., Yoon, J. Y., Chen S. Y. Effect of the cavitation generation unit structure on the performance of an advanced hydrodynamic cavitation reactor for process intensifications. *Chem. Eng. J.* 2021, 412, 15.
18. Вібраційні машини для знезаражування та зміни властивостей води / Гордєєв А. І., Ганзюк А. Л., Костюк Н. О, та ін. Хмельницький: ФОП «Мельник», 2021. 168 с.
19. Гордєєв А. І., Вібраційні машини для знезаражування, зміни властивостей та складу водного середовища гідрокавітацією. «Наука і техніка сьогодні» (Серія «Фізико-математичні науки»): журнал. 2022. № 6(6) 2022. С. 427–439.
20. Nazar Kostyuk, Anatoliy Hordieiev, Algimantas Bubulis, Oleksii Hordieiev. Dynamic processes in the pulsation chamber vibration machine for disinfection of water. *Journal of Vibroengineering - Mechanical vibrations and applications.* 2021. Vol. 23. Is.4. pp.799–809.

#### References

1. Gogate P. R., Pandit A. B. A Review and Assessment of Hydrodynamic Cavitation as a Technology for the Future. *Ultrason. Sonochem.* 2005, 12, pp. 21–27.
2. Badmus K. O., Irakoze N., Adeniyi O. R., Petrik, L. Synergistic Advance Fenton Oxidation and Hydrodynamic Cavitation Treatment of Persistent Organic Dyes in Textile Wastewater. *J. Environ. Chem. Eng.* 2020, 8, 103521.
3. Thanekar P., Panda M., Gogate P. R. Degradation of Carbamazepine Using Hydrodynamic Cavitation Combined with Advanced Oxidation Processes. *Ultrason. Sonochem.* 2018, 40, pp. 567–576.
4. Joshi S. M., Gogate P. R. Intensification of Industrial Wastewater Treatment Using Hydrodynamic Cavitation Combined with Advanced Oxidation at Operating Capacity of 70 L. *Ultrason. Sonochem.* 2019, 52, pp. 375–381.
5. Thanekar P., Gogate P. R., Znak Z., Sukhatskiy Y., Mnykh R. Degradation of Benzene Present in Wastewater Using Hydrodynamic Cavitation in Combination with Air. *Ultrason. Sonochem.* 2021, 70, 105296.
6. Yi C., Lu Q., Wang Y., Wang Y., Yang B. Degradation of Organic Wastewater by Hydrodynamic Cavitation Combined with Acoustic Cavitation. *Ultrason. Sonochem.* 2018, 43, pp. 156–165.
7. Kovačič A., Škufca, D., Zupanc M., Gostiša J., Bizjan, B., Krištofelc N., Dolenc M.S., Heath E. The Removal of Bisphenols and Other Contaminants of Emerging Concern by Hydrodynamic Cavitation: From Lab-Scale to Pilot-Scale. *Sci. Total Environ.* 2020, 743, 140724.
8. Wang J., Chen H., Yuan R., Wang F., Ma F., Zhou B. Intensified Degradation of Textile Wastewater Using a Novel Treatment of Hydrodynamic Cavitation with the Combination of Ozone. *J. Environ. Chem. Eng.* 2020, 8, 103959.
9. Abramov V. O., Abramova A. V., Cravotto, G., Nikonov, R.V., Fedulov, I.S., Ivanov V. K. Flow-Mode Water Treatment under Simultaneous Hydrodynamic Cavitation and Plasma. *Ultrason. Sonochem.* 2021, 70, 105323.
10. Wang B., Su H., Zhang B. Hydrodynamic Cavitation as a Promising Route for Wastewater Treatment A Review. *Chem. Eng. J.* 2021, 412, 128685.
11. Terán H. R., Medeiros, D. R., Sánchez M. S.; Aline P. C. de Sousa Júnior R., da Silva S. S., Santos J. C. Hydrodynamic Cavitation-Assisted Continuous Pre-Treatment of Sugarcane Bagasse for Ethanol Production: Effects of Geometric Parameters of the Cavitation Device. *Ultrason. Sonochem.* 2020, 63, 104931.
12. Gągol M., Przyjazny A., Boczkaj G. Wastewater Treatment by Means of Advanced Oxidation Processes Based on Cavitation—A Review. *Chem. Eng. J.* 2018, 338, pp. 599–627.
13. Gogate P. R. Cavitation: An Auxiliary Technique in Wastewater Treatment Schemes. *Adv. Environ. Res.* 2002, 6, 335–358.
14. Thanekar P., Lakshmi N. J., Shah M., Gogate P. R., Znak Z., Sukhatskiy Y., Mnykh R. Degradation of Dimethoate Using Combined Approaches Based on Hydrodynamic Cavitation and Advanced Oxidation Processes. *Process Saf. Environ. Prot.* 2020, 143, pp. 222–230.
15. Fabio P. Sánchez Vera Gilberto J. Colina Andrade Kevin, Tejada Meza, Jaime Cárdenas García, David Alfredo, Pacheco Tanaka. Continuous Cultivation of Microalgae in Cattle Slaughterhouse Wastewater Treated with Hydrodynamic Cavitation. *Water.* 2022, 14(8), 1288; <https://doi.org/10.3390/w14081288>.
16. Petkovšek M., Mlakar M., Levstek M., Stražar M., Širok B., Dular M. A Novel Rotation Generator of Hydrodynamic Cavitation for Waste-Activated Sludge Disintegration. *Ultrason. Sonochem.* 2015, 26, pp. 408–414.
17. Sun X., You W. B., Xuan X. X., Ji L., Xu X., Wang G. C., Zhao S., Boczkaj G., Yoon, J. Y., Chen S. Y. Effect of the cavitation generation unit structure on the performance of an advanced hydrodynamic cavitation reactor for process intensifications. *Chem. Eng. J.* 2021, 412, 15.
18. Vibrating machines for disinfection and changing the properties of water / A. I. Gordieiev, A. L. Hanzjuk, N. O. Kostyuk, et al. Khmelnytskyi: FOP "Melyk", 2021. 168 p.
19. Gordieiev A.I., Vibrating machines for disinfection, changing the properties and composition of the water environment by hydrocavitation. "Science and Technology Today" (Series "Physical and Mathematical Sciences"): journal. 2022. No. 6(6) 2022. pp. 427–439.
20. Nazar Kostyuk, Anatoliy Hordieiev, Algimantas Bubulis, Oleksii Hordieiev. Dynamic processes in the pulsation chamber vibration machine for disinfection of water. *Journal of Vibroengineering - Mechanical vibrations and applications.* 2021. Vol. 23. Is.4. pp.799–809.