

Н.О. КОСТЮК, А.І. ГОРДЕЄВ, О.А. ГОРДЕЄВ  
Хмельницький національний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ЕНЕРГОВИТРАТ ПРИВОДУ ВІБРАЦІЙНОЇ МАШИНИ ПОРШНЕВОГО ТИПУ ДЛЯ ЗНЕЗАРАЖУВАННЯ ТА ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДИ

При створенні конструкцій різноманітних машин завжди ставиться завдання досягнення енергозбереження технологічного процесу та машини, що проектується. Запропоновано вібраційну машину, яка застосовує низькочастотні вібрації для формування кавітаційних полів у рідинних субстанціях, що обробляються з метою зміни їх властивостей та знезаражування. Проведено дослідження розподілу енерговитрат приводу вібраційної машини на процес знезаражування та зміни властивостей води і визначено витрати потужності приводу при зміні частоти коливань приводу. Запропонована конструкція вібраційної машини показала перспективність застосування запропонованого методу знезаражування і активації води при створенні вібраційних машин індивідуального користування.

Ключові слова: вібраційна машина, кавітація, знезаражування та властивості води.

N. KOSTIUK, A. HORDEEV O. HORDEEV  
Khmelnitskyi National University

### A GROUND OF PARAMETERS OF COMPENSATIVE RESILIENT SYSTEM OF OSCILLATION MACHINE IS WITH ECCENTRIC PERSON OCCASION

The greatest technological interest is attracted by hydrodynamic cavitation devices, in which a local pressure drop is formed in the flow of the processed liquid and hydrodynamic cavitation develops due to a sharp change in the geometry of the fluid flow. Increasing the time of periodic action of cavitation on a liquid medium gives a vibrational change in pressure in the pulsation chamber, which forms the generation of shock waves and leads to disinfection of water and intensification of its structural transformations. When creating designs of various machines, the task is always to achieve energy efficiency of the proposed process and machine. A machine that uses low-frequency vibrations to form cavitation fields in liquid substances that are treated to change their properties and disinfect is proposed. The vibrating machine uses a piston-type activator with an eccentric drive. In order to determine the energy consumption of a piston-type vibrating machine, studies of changes in the energy consumption of the drive when changing the oscillation frequency of the piston by changing the voltage on a DC motor with registration of the current consumed by the eccentric drive of the vibrating machine. Researches of distribution of power consumption of the drive of the vibrating car on process of disinfection and change of properties of water are carried out and expenses of power of the drive are defined. The created design of the vibrating machine showed the prospects of application of the proposed method of disinfection and activation of water in the creation of vibrating machines for individual use.

Keywords: vibrating machine, cavitation, disinfection and water properties.

### Вступ

Вода є важливою складовою життєвого процесу. Вона грає роль не тільки хімічного розчинника, але є хранителем і переносником інформації, несе коди життєвих процесів, і в міру розвитку науки відкриваються все нові процеси впливу на людину і техніку через вплив на воду, через нові фізичні принципи і явища активації води і водних систем.

У розробку теоретичних основ і технології водної підготовки і очищення стічних вод вагомий внесок внесли Л.А. Кульській, І.М. Гороновській, О.М. Когановській, М.О. Шевченко, М.К. Ротмютров і багато інших відомих вчених. В останні роки вплив ефектів гідрокавітації на знезаражування та зміну властивостей водного середовища вивчали І.М. Федоткін, І.С. Гулий, А.І. Некоз, А.А. Литвиненко, П.М. Немирович, Т.М. Вітенько, Л.І. Шевчук, І.С. Афтаназів, Р.І. Сілін і інші вчені [1-4].

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Молекула води є активним диполем, де киснева сторона негативна, а воднева позитивна. В результаті молекули води притягуються своїми протилежними полюсами, і утворюють полярні зв'язки, на розрив яких потрібно витратити певну енергію. У складі кожної молекули іон водню (протон) не має внутрішніх електронних шарів і має малі розміри, в результаті чого він може проникати в електронну оболонку негативно поляризованого атома кисню сусідньої молекули, утворити водневий зв'язок з іншою молекулою, тобто вони є диполями води. Диполі є основною причиною утворення мікрокластерної структури води. Кавітаційне поле є одним з факторів який впливає на стан упорядкованості структури води та її знезаражування.

Найбільший технологічний інтерес привертають гідродинамічні кавітаційні пристрої, у яких в потоці рідини, що оброблюється, утворюється місцеве зниження тиску і за рахунок різкої зміни геометрії течії рідина розвивається гідродинамічна кавітація [1]. Енергія для виникнення кавітації підводиться безпосередньо технологічним потоком рідини (гідродинамічні пристрої статичного типу), або обертовим кавітатором (гідродинамічні пристрої динамічного типу) [2].

Кавітація у рідини виникає на одиничному зародку. Потім за час, в кілька десятків періодів коливань, мікробульбашки розвиваються в стабільну область, яка складається з безлічі кавітаційних бульбашок. Процес розвитку кавітаційної області представляється у такий спосіб. При сплескуванні кавітаційна бульбашка може втрачати стійкість і розпадатися на частини, а при тому, що тиск і температура

в цей момент в бульбашці максимальні, то тиск і температура газової суміші, що «утворилися в осколках» теж підвищені. У фазі розтягування вони легко розширюються і стають новими зародками кавітації, менш міцними, ніж постійно наявні в рідині. Кавітаційні порожнини, що виникли на цих зародках, породжують нові. У середині кавітаційної області йде безперервний процес розмноження і коагуляції кавітаційних бульбашок, причому кавітаційний поріг трохи зменшується, тому, що в сталому режимі роль кавітаційних зародків починають виконувати рівноважні бульбашки, обсяг і газовміст в яких більше ніж у зародків.

Використання вібраційних коливань в технологіях з рідким середовищем обумовлено поліпшенням якісних показників, а в деяких випадках єдиною можливістю реалізації технологічних процесів. Зазвичай, кавітаційний вплив використовується як один з етапів знезаражування та очищення водного середовища.

З проведених досліджень по знезаражуванню та зміні властивостей води і її структурного стану з використанням різних методів активації [4], було встановлено, що на знезаражування води і її структуризацію призводить вплив наступних кавітаційних факторів: періодичність та тривалість зміни величини тиску, поява термобаричних ефектів, зміна величини електростатичного поля на поверхні бульбашок, зміна коефіцієнта поверхневого натягу, проходження хімічних реакцій за участю активних газів з утворенням нових сполук. З досліджень [4] встановлено, що отриманий стан активованої води зберігається до трьох діб, після чого відбувається стабілізація показників: рН, ОРР, але на рівні значно більшому для рН і меншим для ОРР, ніж вихідний рівень. Це дозволяє стверджувати про поліпшення властивостей води. Зменшується показник загальної концентрації вмісту розчинених солей від 400 до 300 одиниць, що говорить також про поліпшення якості води. Основною ідеєю створення ефективного режиму роботи вібраційних машин є створення режиму генерації кавітаційних бульбашок, при якому вони зароджуються в масовій кількості завдяки зворотно-поступальному проходженню рідини крізь отвори з гострими крайками. Описані ефекти отримані на запропонованих вібраційних машинах [5,6]. Необхідність збільшення часу періодичної дії кавітації на рідинне середовище дозволяє використання вібраційної зміни тиску у камері пульсації, що утворює генерацію ударних хвиль та призводить до знезаражування води і інтенсифікацію її структурних перетворень. Створення класу енергоощадних малогабаритних вібраційних гідрокавітаційних машин для індивідуального використання з метою безреагентного знезаражування води та зміни її властивостей води є актуальним завданням.

#### Виклад основного матеріалу

При створенні конструкції різноманітних машин завжди ставиться завдання досягнення енергозбереження технологічного процесу та машин, що проектується. З метою визначення енерговитрат вібраційної машини поршневого типу [5] (рис.1 та рис.2) було проведено дослідження енерговитрат приводу при зміні частоти коливань поршня за допомогою варіації величини напруги на електродвигуні постійного струму з реєстрацією величини сили струму, що споживає ексцентриковий привод вібраційної машини для проведення технологічного процесу.

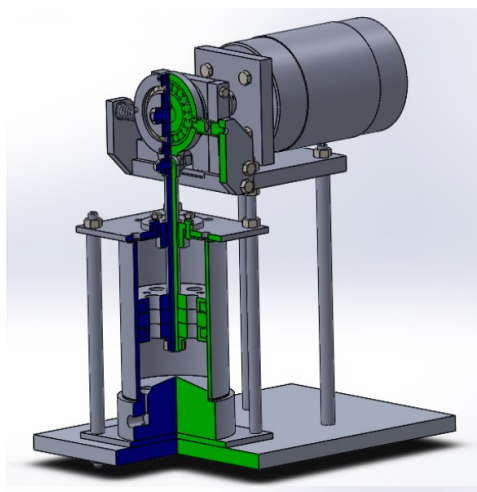


Рис.1 – Просторова 3D-модель вібраційної машини поршневого типу

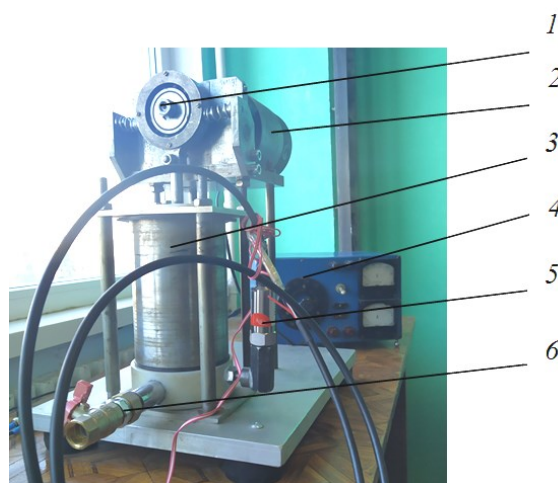
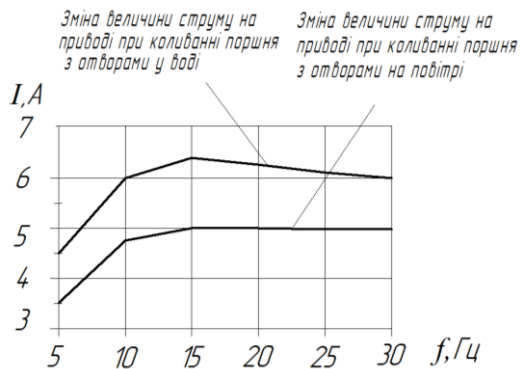
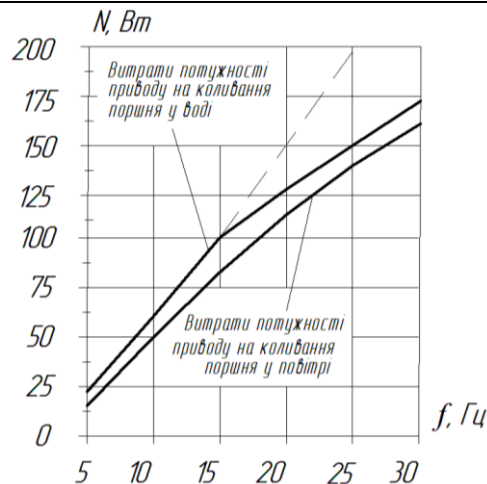


Рис.2 – загальний вигляд дослідної вібраційної машини:  
1 – ексцентриковий вузол; 2 – електродвигун; 3 – камера пульсації; 4 – прилад керування частотою коливань;  
5 – датчик тиску; 6 – кран для зливу води

Прилад керування частотою коливань 4 оснащено амперметром та вольтметром постійного струму, що дозволяло при зміні напруги постійного струму змінювати частоту коливань поршня та контролювати зміну величини сили струму, який споживає електродвигун постійного струму 2. З графіка (рис.3) встановлено, що сила струму зростає при збільшенні частоти коливань приводу при коливанні поршня на повітрі та при збільшенні частоти від 15 Гц і далі сила струму стає стала. Ця енергія витрачається на сили тертя у машині, інерційні сили та сили пружної системи.



**Рис.3 – Графіки залежності зміни сили струму привода робочого органа вібраційної машини для знезаражування води від частоти коливання поршня в різних середовищах**



**Рис.4 – Графіки залежності витрат потужності привода робочого органа вібраційної машини для знезаражування води від частоти коливання поршня в різних середовищах**

Також з графіка (рис.3) встановлено, що сила струму зростає при збільшенні частоти коливань приводу та більше на 1,5А при коливанні поршня у воді чим на повітрі. Відповідно до попередніх енерговитрат додаються витрати на генерацію ударних хвиль та кавітаційний процес у отворах в поршні, але починаючи з частоти 15 Гц сила струму знижується з 6,5 до 6 А, що говорить про утворення в камері пульсації 3 значної кількості бульбашок великих розмірів (виникає додатковий пружний елемент), що знижує виток (проходження) рідини крізь отвори у поршні та знижує швидкість перемішування води в камері пульсації – відповідно знижується продуктивність кавітаційної дії.

На основі отриманих вимірювань, побудовано графік витрат потужності приводу робочого органа вібраційної машини, представлений на рис.4. З якого встановлено, що потужність приводу на проведення коливань поршня у воді також має нелінійний характер (відхилення від штрихової лінії після частоти 15Гц).

Результатом аналізу фізичних та фізико-механічних явищ, що протікають в процесі кавітаційної обробки води, стало рівняння балансу енерговитрат на роботу приводу вібраційної машин поршневого типу.

Загальні енерговитрати на виконану роботу  $A_{заг.випр}$  можна представити як суму наступних видів робіт:

$$A_{заг.випр} = A_{мех.випр.} + A_{нагрів.} + A_{кавіт.реакції} \tag{1}$$

де  $A_{мех.випр.}$  – робота, яка витрачається на інерційні сили та тертя в обладнанні;

$A_{нагрів.}$  – робота на нагрівання води та елементів обладнання (без урахування дисипації тепла в повітря);

$A_{кавіт.реакції}$  – робота, що необхідна для протікання кавітаційних реакцій.

При проведенні дослідів по обробленні води при амплітуді коливань 0,002 м було визначено загальну роботу, що виконав привод обладнання на різних частотах коливань за період  $t = 15$  хв. Розрахунок величини роботи на загальні витрати приводу проводився за формулою:

$$A_{заг.випр} = U \cdot I \cdot t \tag{2}$$

де  $U$  – напруга в мережі живлення електродвигуна, В;  
 $I$  – сила струму, що його споживає електродвигун приводу, А,  
 $t$  – тривалість часу обробки, с.

Результати розрахунків  $A_{заг.випр.}$  представлені у табл.1.

Таблиця 1

**Загальна робота приводу, витрачена на коливання поршня у воді**

№	Параметр	Зміна параметрів та результат розрахунку					
		5	10	15	20	25	30
1	$U, (В)$	5	10	15	20	25	30
2	$I, (А)$	4.5	6	6.4	6.2	6	5.9
3	$A_{заг.випр.}, (Дж)$	20250	54000	86400	111600	135000	159300

Механічні втрати при роботі обладнання на холостому ході у повітрі були визначені експериментально та розраховані за залежністю (1) і представлені у таблиці 2.

Таблиця 2

## Загальна робота приводу, витрачена на механічні витрати при коливання поршня у повітрі

№	Параметр	Зміна параметрів та результат розрахунку					
		5	10	15	20	25	30
1	$U, (В)$	5	10	15	20	25	30
2	$I, (А)$	3,5	4,8	5	5	4,9	4,9
3	$A_{мех.випр.} (Дж)$	15750	43200	67500	90000	110250	132300

Експериментально було встановлено, що частина роботи витрачається на розігрів рідини та елементів машини. Було визначено зміну температури нагрівання води та елементів обладнання при амплітуді 0,002 м та частоті коливань приводу 15 Гц ( $U=15В$ ), яка склала  $\Delta t = 3^0 С$  за період 15 хв. Нагрівалась вода  $m_1 = 1,0$  кг, сталевий корпус масою  $m_2 = 1,6$  кг, пластмасовий поршень  $m_3 = 0,3$ кг. Робота, витрачена на нагрівання води та елементів машини, визначалася за формулою:

$$A_{нагрів.} = c_1 \cdot m_1(t_2 - t_1) + c_2 \cdot m_2(t_2 - t_1) + c_3 \cdot m_3(t_2 - t_1), = 11120 \text{ Дж}, \quad (3)$$

де  $c_1 = 4190$  Дж/кг – теплоємність води;

$c_2 = 500$  Дж/кг – теплоємність заліза;

$c_3 = 1900$  Дж/кг – теплоємність пластмаси.

Робота приводу на виконання кавітаційних реакцій за період 15 хвилин визначалася за формулою:

$$A_{кавіт.реакції} = A_{заг.випр} - (A_{мех.випр.} + A_{нагрів.}) = 86400 - (67500 + 11120) = 7780 \text{ Дж}.$$

Проведемо аналіз процесів перетворення складу води, на які витрачається енергія при проходженні кавітаційних реакцій. Експериментальними дослідженнями [7] було визначено, що за той же період обробки (15 хв.) змінюється склад газового наповнення водного середовища. Отримані результати досліджень процесу кавітаційного впливу показали, що вплив гідрокавітації збільшує вміст азоту у відістеляті води до 5 разів [8]. Після аналізу отриманих результатів, якщо врахувати те, що азот береться з повітря, а аміак розчиняється у воді, то від'ємне значення вільної енергії Гібса при змінному тиску можливе за умов від'ємної різниці кінцевих та початкових об'ємів реагуючих речовин та продуктів реакції, що дає можливість проведення реакції за даних умов:

$$\Delta V = V_k - V_n, \quad \Delta V < 0, \quad (4)$$

де  $\Delta V$  – зміна об'ємів;

$V_k$  – об'єм продуктів реакції;

$V_n$  – об'єм речовин, що вступають у реакцію.

Тоді протікання кавітаційних реакцій можливе при умовах, тобто:

$$\left( \frac{\partial \Delta G}{\partial p} \right)_T = \Delta V, \quad \Delta V < 0, \quad (5)$$

де  $\Delta G$  – зміна вільної енергії Гібса;

$p$  – тиск;

$T$  – температура.

Ці умови підтверджується також розрахунками:

$$\begin{aligned} \Delta G_{реакції} &= \Delta G_{Fe(OH)_2} + \Delta G_{NH_3} - \Delta G_{H_2O} - \Delta G_{N_2} - \Delta G_{Fe} = \\ &= -115,57 \frac{\text{ккал}}{\text{моль}} + 2 \left( -3,976 \frac{\text{ккал}}{\text{моль}} \right) - 2 \left( -56,690 \frac{\text{ккал}}{\text{моль}} \right) - \\ &- 3 \cdot 0 \frac{\text{ккал}}{\text{моль}} - 3 \cdot 0 \frac{\text{ккал}}{\text{моль}} = -10,1408 \frac{\text{ккал}}{\text{моль}} = -42,38 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}. \end{aligned}$$

Отже, розрахунки показали, що  $\Delta G < 0$ , звідси висновок – реакція можлива за даних умов.

Зменшення протягом кавітаційної обробки концентрації нітритів та збільшення концентрації нітратів можна пояснити поступовим окисненням нітритів ( $N^{3+}$ ) до нітратів ( $N^{5+}$ ) киснем повітря. Зростанням ступеня окиснення нітритів до нітратів можна пояснити збільшенням валентності атомарного азоту ( $N^{3+} \rightarrow N^{5+}$ ) та наявністю органічних речовин, які містяться у воді. Отриманий ефект пояснюється тим, що при закритті кавітаційних бульбашок виникає зміна статичної електрики на поверхні бульбашки, значний тиск та температура. Усе це спричинює гемолітичний розрив ковалентних зв'язків у молекулі води та утворення радикальних частинок  $H^+$  та іонів  $OH^-$  і  $O$ , що мають підвищену окиснювальну здатність. Хоча значна частина іонів  $H^+$  і залишається у потоці рідини, вони характеризуються високою рухливістю і можуть швидко дифундувати з потоку. Іони  $OH^-$ , навпаки, накопичуються, що загалом призводить до зростання показника рН.

Отже, розрахована енергія, яка витрачається на виконання роботи кавітаційних реакцій, має достатню величину для проходження кавітаційних перетворень складу води.

Отриманий розподіл робіт, витрачених на різні процеси, дозволяє розрахувати коефіцієнт витрат енергії на кавітаційні реакції при роботі вібраційної машини за певний період (як приклад приведено його розрахунок за період 15 хвилин).

$$K_{\text{кавіт.реакції}} = \frac{A_{\text{кавіт.реакц.}}}{A_{\text{заг.витр.}}} = \frac{7780}{86400} = 0,1.$$

### Висновки

У результаті аналізу експериментальних та аналітичних витрат енергії приводу вібраційної машини поршневого типу встановлено напрями розподілу витрат потужності приводу машини при зміні частоти коливань приводу за основними видами: механічні, нагрівання середовища та кавітаційні реакції.

Отримані залежності витрат потужності привода робочого органа вібраційної машини для знезаражування води від частоти коливання поршня показали, що енерговитрати на процес знезаражування та зміни властивостей потребують від 100 до 175 Вт, що говорить про енергощадність в порівнянні з іншими видами обладнання, призначеного для знезаражування.

Експериментальні та аналітичні дослідження підтвердили можливість проходження кавітаційних хімічних реакцій та зміни складу водного середовища при використанні вібраційної машини поршневого типу.

Отримані результати можуть бути враховані при розробленні технологій та конструкцій вібраційного обладнання для очищення стічних вод промислових, комунальних підприємств, тваринницьких комплексів тощо.

### Література

1. Шевчук Л.І. Кавітація. Фізичні, хімічні, біологічні та технологічні аспекти: монографія / Л. І. Шевчук, В. Л. Старчевський. – Л.: Видавництво Львівської політехніки, 2014. – 376 с.
2. Вітенько, Т. М. Гідродинамічна кавітація у масообмінних, хімічних і біологічних процесах [Текст]: монографія / Т. М. Вітенько. – Тернопіль: ТДТУ ім. І. Пулюя, 2009. – 224 с.
3. Низькочастотні віброрезонансні кавітатори: монографія / Л.І. Шевчук, І.С. Афтаназів, О.І. Строган, В.Л. Старчевський. – Львів: Видавництво Львівської політехніки. 2013. – 173 с.
4. 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.
5. Пат. на корисну модель №126495 України. МПК С02F 1/00, Вібраційна машина для знезаражування водних середовищ / А.І. Гордєєв, Н.О. Костюк; – № u2018 10090; заяв. 02.01.2018; опубл. 25.08.2018, Бюл. №12.
6. Пат. на корисну модель № 140291 України, МПК С02F 9/00. Вібраційна машина для знезаражування води та її очистки / Гордєєв А.І., Ганзюк А.Л., Кравчук О.В., Кравчук В.В. Нездоровін В.П., Костюк Н.О. – u2019 08456; Заяв. 17.07.2019. Опубл. 10.02.2020, Бюл. №3.
7. Сілін Р. І. Вібраційне обладнання на основі гідропульсатора: монографія / Р. І. Сілін, А. І. Гордєєв. – Хмельницький : ХНУ, 2007. – 386 с.
8. 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.

### References

1. Shevchuk L.I., Starchevsky V.L., Cavitation. Physical, chemical, biological and technological aspects: monograph. L. : Lviv Polytechnic Publishing House, 2014. 376 p.
2. Vitenko T.M. Hydrodynamic cavitation in mass transfer, chemical and biological processes [Text]: monograph. Ternopil: TSTU named after I. Pulyuya, 2009. 224 p.
3. Shevchuk L.I., Aftanaziv I.S., Strogan O.I., Starchevsky V.L. Low-frequency vibration resonance cavitators: a monograph. Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2013. 173 p.

- 
4. Silin R.I., Baran B.A., Hordeev A.I. Properties of water and modern methods of its purification. Khmelnytskyi: KhNU, 2009. 254 p.
  5. Pat. on the utility model №126495 of Ukraine. IPC C02F 1/00, Vibrating machine for disinfection of aquatic environments / A.I. Hordeev, N.O. Костюк; - № in 2018 10090; application. 02/01/2018; publ. 08/25/2018, Bull. №12.
  6. Pat. on the utility model № 140291 of Ukraine, IPC C02F 9/00. Vibrating machine for water disinfection and purification / Hordeev A.I., Ganzjuk A.L., Kravchuk O.V., Kravchuk V.V., Nezdorovin V.P., Kostyuk N.O. - in 2019 08456; Application. 07/17/2019 Publ. 10.02.2020, Bull. №3.
  7. Silin R.I., Hordeev A.I. Vibrating equipment based on a hydropulsator: a monograph. Khmelnytskyi: KhNU, 2007. 386 p.
  8. Silin R.I., Hordeev A.I., Tretyko V.V., Soroka I.I. Cavitation treatment and its effect on water storage. Bulletin of the TUP. №3. 2002. 253-257 pp.

Надійшла / Paper received : 18.11.2020 р. Надрукована/Printed :04.01.2021 р.