

УДК [53.043+53.06+608.4+608.2]:[532.63+[534-8:534-143]]:628.166

Д.А. Багдасарян, О.Д. Петренко, О.Ф. Луговський

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Технологія ультразвукового кавітаційного знезараження рідин

На сьогоднішній день населення землі складає приблизно 7.8 мільярдів людей і цей показник росте щодня [1]. Це набагато більше, ніж, наприклад, 50 років тому. Разом з населенням землі збільшуються міста, обсяги виробництва підприємств, а також і кількість відходів, сміття. Всі, вище перелічені, фактори сприяють забрудненню довкілля, а отже і водних запасів прісної води.

Перейдемо до простих математичних обчислень: зі зменшенням запасів прісної води і ростом населення землі, кількість питної води на душу населення стрімко падає. За даними ВОЗ, приблизна добова норма вживання води для людини в середньому дорівнює 2.5 л/добу [2]. Отже за добу людство вживає приблизно 19.5 мільярдів літрів питної води.

263

За підрахунками запас води на нашій планеті складає приблизно 1400 мільярдів літрів води [3], з яких прісною є приблизно 3%. Це 42 мільярди літрів. Вся ця вода, окрім вживання людьми, використовується у побуті, сільському господарстві, виробництві та багатьох інших аспектах людської діяльності. Очевидним є те, що очищення і знезараження води є критично необхідним для людства.

Нині існуючі технології очищення і знезараження питної води умовно можна розділити на декілька груп:

- термічні;
- хімічні;
- фізичні;
- фізико-хімічні.

До термічних способів очищення води відносять кип'ятіння і заморожування.

Кип'ятіння є одним з найпростіших способів знезараження води. Бактерицидний ефект досягається після кількох хвилин обробки на відкритому полум'ї, або з використанням плазми чи перегрітої пари і не залежить від фізико-

хімічного складу води [4]. Цей процес легко контролювати і він може бути автоматизований, проте не має пролонгованої дії і є економічно доцільним лише у малих побутових об'ємах. Вода дезінфікована таким чином не може бути вживана одразу після обробки через її високу температуру і має охолоджуватись. В процесі охолодження вода досягає температури, сприятливої для розмноження бактерій. Отже, такий метод не є ефективним і не дозволяє отримати якісний кінцевий продукт.

Заморожування. Бактерицидний ефект досягається за температур не сумісних з життям мікроорганізмів, в іншому випадку лише сповільнюється життєдіяльність бактерій. Є дорогим і неефективним методом інактивації мікроорганізмів, тому не слід розглядати його, як метод очищення і знезараження рідини.

Найбільш поширеним є хімічний метод знезараження [5,6]. Загалом, всі способи хімічного знезараження полягають у додаванні до води хімічних з'єднань, що окислюють органічні речовини у внутрішньоклітинній речовині мікроорганізмів. При цьому застосовуються хлоровмісні сполуки, такі як, гіпохлорит натрію NaClO , діоксид хлору ClO_2 і хлорамін NH_2Cl . Технологія хімічного знезараження наряду з пролонгованою дією і відносною дешевизною є дуже шкідливою, особливо при вживанні такої води у довгостроковому періоді та може викликати такі хвороби як атеросклероз, рак, анемію, алергічні реакції та інші [7]. Тому хімічна технологія потребує підвищеного контролю за дозуванням, безпекою обслуговуючого персоналу та концентрацією побічних галогеновмісних, хлорорганічних продуктів і тригалометанів, що утворюються в процесі окислення [7]. Це значно підвищує складність виробництва і, відповідно, ціну. Така технологія знезараження не задовольняє вимогам якості продукту.

Озонування є набагато безпечнішим способом у порівнянні з хлоруванням і не потребує дуже точного дозування та не утворює небезпечних побічних продуктів, оскільки надлишок перетворюється на кисень. Проте, через високу окислювальну здатність, матеріал обладнання має відповідати антикорозійним вимогам. До того ж ефективність подібної технології знезараження значною мірою залежить від хімічного та фізичного складу води, а також її температури та кислотності. Такий метод не має пролонгованої дії, а побічні продукти такі, як

пероксид, епоксид, формальдегід, ацетальдегід, що утворюються в процесі окислення, є ідеальною їжею для мікроорганізмів і, відповідно, означає швидке повторне зараження води, а тому вимагає додаткової післяобробки. Озон є небезпечним для дихальних шляхів людини і є вибухонебезпечним, що потребує підвищеного рівня навчання і охорони праці обслуговуючого персоналу. Всі, вище перераховані, фактори значно впливають на ціну виробництва такої води і роблять цю технологію економічно недоцільною для використання, особливо в малих об'ємах.

Наряду з озонуванням і хлоруванням є й інші реалізації хімічної технології знезараження води. Це йодування, бромовання, використання перекису водню. Всі вони не так розповсюджені і мають схожий принцип дії. Через ряд їх недоліків не будемо зупинятися на їх огляді, а перейдемо до фізико-хімічної технології знезараження рідини.

Серед розповсюджених способів реалізації фізико-хімічної технології знезараження виділяються метод іонізації та метод сольового електролізу.

Метод іонізації полягає у введенні до води молекул металів, таких як мідь, срібло чи золото, іони яких потрапляють до внутрішньоклітинної речовини мікроорганізмів, де взаємодіють з сірковмісними амінокислотами, що беруть участь в процесі фотосинтезу і припиняють його, внаслідок чого клітина відмирає. Даний метод має пролонговану дію та відсутність специфічного смаку і запаху кінцевого продукту, а введені молекули металів виконують функцію коагулянту, утворюючи частинки, які можна відфільтрувати. Проте через дороговизну металів та їх накоплення в організмі людини, що вживає таку воду (спричиняються запалення слизової оболонки шлунково-кишкового тракту, прояву ниркової недостатності, атаксії, паралічу дихальних шляхів і т.д.), цей метод не задовольняє вимогам безпеки та вартості.

Метод сольового електролізу полягає в утворенні хлору в процесі електролізу в розчині кухонної солі у воді. Цей метод загалом є хлоруванням води з тими самими недоліками і перевагами. Має два способи реалізації. Перший, це - спосіб проточного електролізу, що полягає в електролізі підсоленої води з утворенням хлоруватистої кислоти (HOCl), що знищує мікроорганізми з наступним утворенням солі, що може бути використана знову. Другий спосіб полягає в електролізі солі в окремому резервуарі з утворенням гіпохлориту

натрію (NaClO), який у газоподібному стані вводиться до води, що має бути очищена [13]. Вода, оброблена в перший спосіб, буде мати солонуватий присмак, який необхідно нейтралізувати додатковими технологічними операціями. Загалом для реалізації способу необхідна дуже дешева сировина, яка, до того ж, може повторно використовуватись у випадку з проточним електролізом. Проте необхідне дуже дороге обладнання, ціна якого росте з обсягами виробництва. У сукупності з вищеописаними недоліками хлорування метод сольового електролізу цілком не задовольняє сучасним потребам з водоочищення.

Наступна група методів знезараження – це фізичний спосіб знезараження. До нього відносяться:

- метод зворотного осмосу;
- метод ультрафіолетового випромінювання;
- метод ультразвукової кавітаційної обробки.

Метод зворотного осмосу є досить розповсюдженим методом очистки рідини. Застосування штучних мембран з дуже малими отворами дозволяє очистити рідину не тільки від механічних включень та домішок, а й від шкідливих для здоров'я людини мікроорганізмів. Ці мембрани і є головною проблемою методу, адже для боротьби з мікроорганізмами необхідно зменшувати прохідні отвори мембрани, а для забезпечення продуктивності збільшувати їх площу. До того ж, мембрана здатна засмічуватись і потребує заміни і обслуговування, а в іншому випадку стає джерелом забруднень. Також виникає проблема утилізації таких мембран. Отже, не дивлячись на розповсюдженість цього методу, він є малоефективним і доволі проблемним.

Метод ультрафіолетового випромінювання полягає у впливі ультрафіолетових хвиль на РНК і ДНК клітин мікроорганізмів і унеможливорює їх подальше розмноження. Основною перевагою фізичних методів в цілому є відсутність реагентів. Стосовно застосування ультрафіолетового випромінювання слід зазначити, що метод є високоефективним у боротьбі з забруднювачами, розкладає органічні речовини і хлораміни, не утворює побічних продуктів і є доволі економічним. Проте ефективність методу залежить від багатьох факторів, зокрема прозорості та жорсткості води, напруги живлення лампи та товщини оброблюваного шару.

Відсутність пролонгованої дії, різноманіття вимог до очищуваної рідини, низький ККД УФ-ламп (приблизно 8.5%) та складність проведення оперативного контролю за ефективністю знезараження не дозволяють повноцінно використовувати даний спосіб, як самостійну технологію знезараження води.

Ультразвукова кавітаційна технологія набуває все більше популярності, як безреагентний метод знезараження питної води.

Принцип дії цього методу заснований на введенні в рідину ультразвукових хвиль, інтенсивність яких перевищує поріг виникнення кавітації за даних умов. Вторинні ефекти, що супроводжують явище ультразвукової кавітації знищують шкідливі мікроорганізми за рахунок локального високого тиску та високих температур, інтенсивних вибухових хвиль та кумулятивних струменів, окислення середовища та механічного руйнування при схлопуванні кавітаційних бульбашок в фазі стиснення ультразвукової хвилі, що встановилася в об'ємі рідини. Ультразвукові установки мають високу швидкодію, простоту і надійність в експлуатації, можливість очищати рідину як в потоці, так і в ємності, легкість контролю і автоматизації процесу. Є можливість використання способу, як єдиного етапу очищення, так і в комплексі з іншими способами, розглянутими вище. Попри очевидні переваги, існують недоліки, пов'язані з руйнуванням поверхонь внаслідок кавітаційної ерозії.

267

Ефективність роботи незалежно від хімічного чи фізичного складу води, а також широкий спектр дії на мікроорганізми, віруси, бактерії і навіть деякі хімічні сполуки, а також відсутність реагентів спонукає до розвитку і застосування цього методу для знезараження рідин.

На даний момент були розроблені декілька конструкцій кавітаційних ультразвукових установок. Вони відрізняються за розміром, призначенням, кількістю випромінювачів і їх розташуванням в камері. Головним елементом конструкції є випромінювач Ланжевена, що представляє собою п'єзоелектричні кільця затиснуті сталевими пластинами [8,9]. Для збільшення амплітуди коливань, а отже й інтенсивності кавітаційних явищ, одну з пластин доповнюють трансформатором коливальної швидкості різних форм: конічної, експоненційної, ступінчастої або лезоподібної (рис. 1). Криві показують розподілення амплітуди v та деформації u' по довжині концентратора.

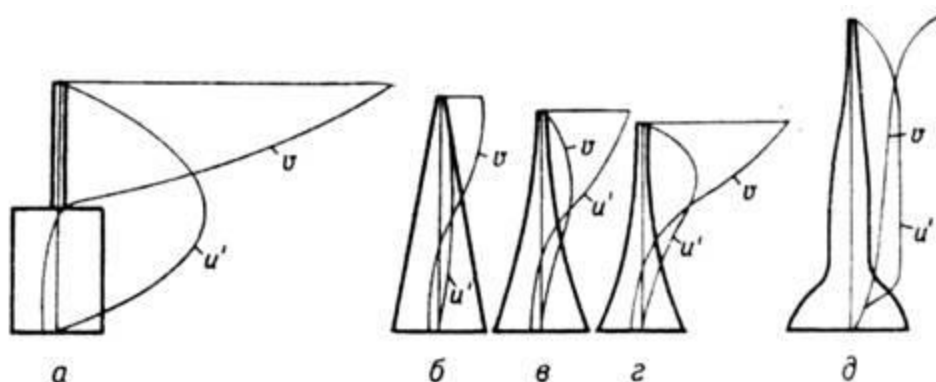


Рис.1. Трансформатори ультразвукових коливань (акустичні концентратори):
а – ступінчастий, б – конічний, в – експоненційний, г – катеноїдальний,
д – гауссів (ампульний)

Були створені різні конструкції ультразвукових установок, залежно від призначення. Вони бувають проточні і ємнісні. Прикладом ємнісної установки є кавітаційна ванна (рис. 2а), а прикладом проточної є проточна товстостінна камера з радіальним збудженням (рис. 2б).

268

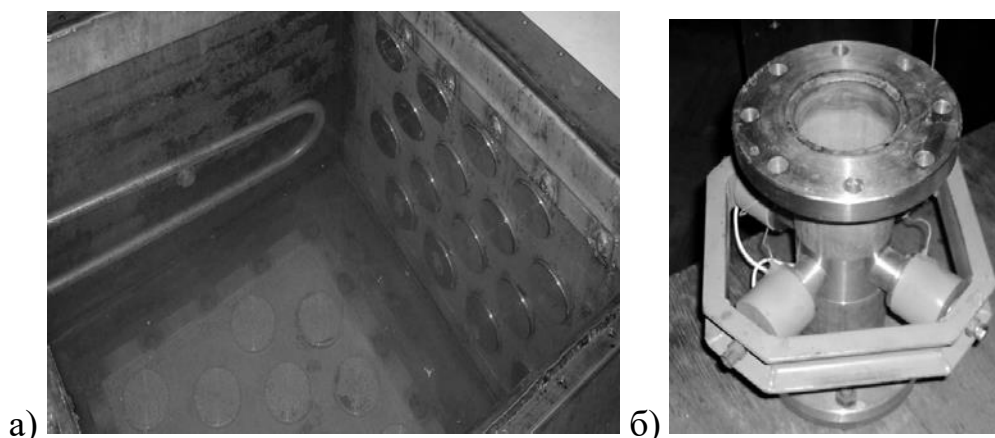


Рис. 2. Приклади ультразвукових кавітаційних установок:
а – ємнісного типу, б – проточного типу

Перед розробкою конструкцій, які будуть описані нижче, були сформульовані такі вимоги:

- мобільність;
- можливість використання в природних умовах (за умови існування джерела електричної енергії);
- ефективність знезараження, достатня для вживання води «з водойми»;
- висока продуктивність.

Були розроблені два прототипи: проточного і ємнісного типу.

Обидва прототипи невеликих розмірів, здатні живитися від автомобільного акумулятора і показали гарні результати з очищення води, набраної з природної водойми (рис. 3) [10,11].

Перша установка проточного типу має гарні показники очищення, але їх може бути недостатньо у випадку занадто забрудненої води. Для досягнення необхідного часу перебування шкідливих мікроорганізмів в кавітаційній зоні, тобто необхідного ступеню знезараження води, приходиться декілька разів пропускати води через установку. Іноді, в умовах забрудненого чи несприятливого довкілля (наприклад дощу, пилової бурі, техногенної катастрофи) ручне переливання обробленої води може сприяти її повторному забрудненню.

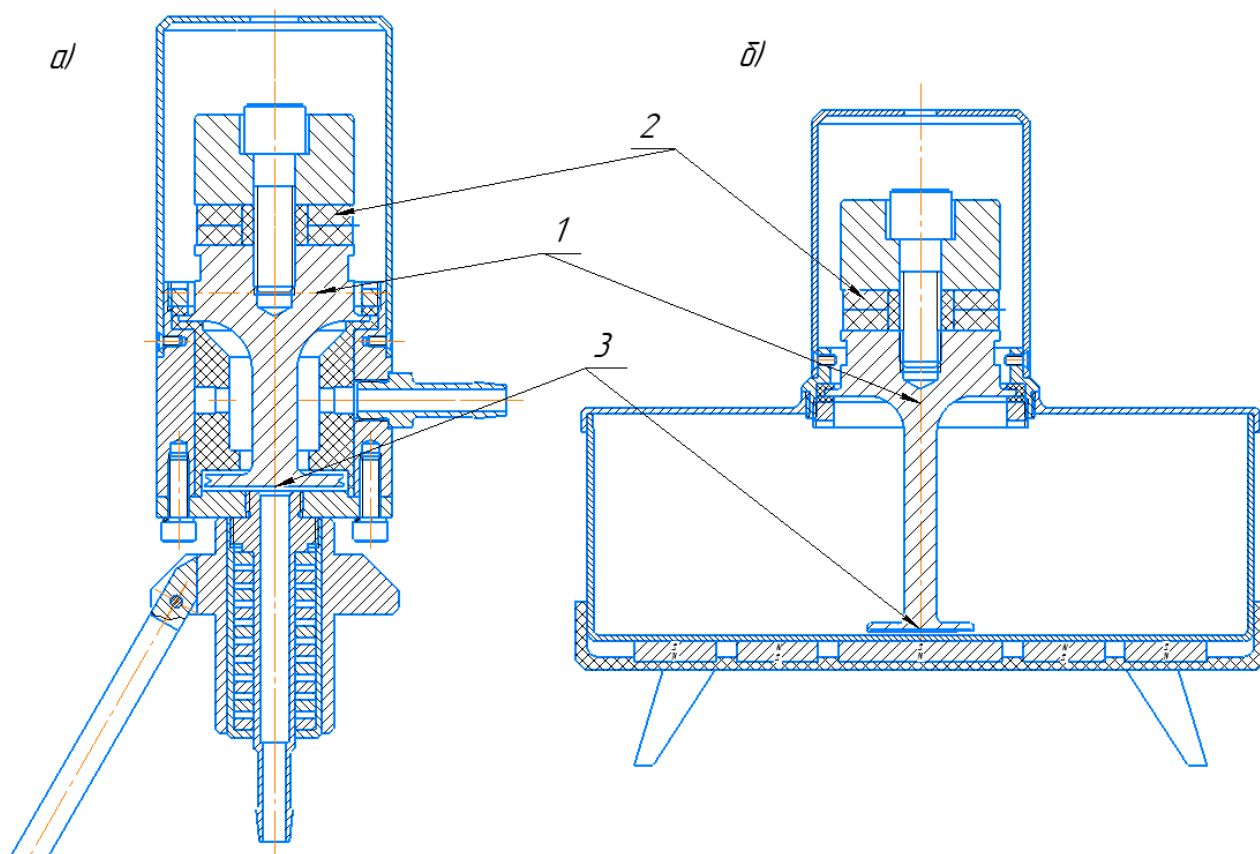


Рис.3. Ультразвукові установки: а – проточного, б – ємнісного типу,
1-акустичний концентратор, 2 – п'єзокерамічні пластини,
3 – випромінююча поверхня

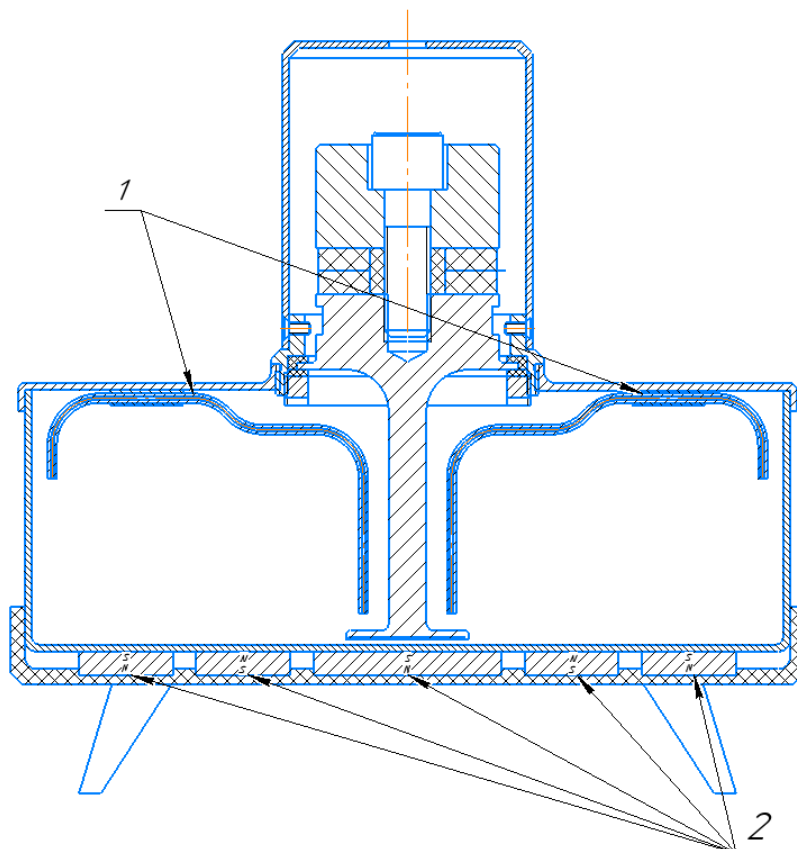
Схожа проблема виникає і у другій установці ємнісного типу. Випромінювач утворює необхідну для знезараження інтенсивність ультразвукової енергії в тонкому шарі рідини, але віддалені ділянки ємності залишаються необробленими.

Тож необхідно створити ефективний механізм циркуляції води в установці без втручання людини, не використовуючи при цьому сторонніх агрегатів, які споживають додаткову електричну енергію.

Для вирішення цієї проблеми можна запропонувати застосування звукокапілярного ефекту. Суть цього ефекту полягає в піднятті рідини по капіляру під дією кавітації в ультразвуковому полі біля нижнього зрізу капіляра. Ефект виникає при інтенсивній кавітації і певному звуковому тиску на вході в капіляр. Вперше цей ефект спостерігався Вільямом Річардсом. Причому, даний ефект спостерігається в діапазоні ультразвукових частот порядку 20-50 кГц, в якому працюють вищеописані установки. Точна причина виникнення цього ефекту досі невідома. Але виділяють два основні фактори, що могли б впливати на утворення такого ефекту. Це збільшенням текучості рідини під впливом температури та локальне підвищення тиску в кавітаційній зоні [12]. Впливає і зменшення поверхневого тертя в капілярній трубці, яка також починає вібрувати в ультразвуковій кавітаційній зоні.

270

На рис.5 представлено запропоновану конструкцію, що має механізм циркуляції рідини за рахунок звукокапілярного ефекту. Роль капілярів відіграють мідні трубки 1 діаметром 0.7 мм, що застосовуються у холодильних установках. Торець цих трубок підведений до одної з поверхонь випромінювача, на якій відбуваються інтенсивні кавітаційні явища, тому у трубках спостерігається звукокапілярний ефект [12]. Рідина, що піднімається по трубкам, спрямована до стінок ємності. Це забезпечує приток необробленої рідини до випромінювача, тим самим забезпечує рівномірне оброблення усього об'єму води. До того ж мідь, що контактує з водою, виконує додаткову функцію іонізації, описану вище. Магніти 2 встановлені на дні ємності виконують обробку води магнітним полем, яка необхідна після інтенсивних кавітаційних явищ в рідині для відновлення структури води.



271

Рис.5. Ультразвукова установка ємнісного типу з механізмом циркуляції рідини в ємності, реалізованого за допомогою звукокапілярного ефекту

Висновки:

1. Проблема очищення та знезараження питної води є дуже актуальною в сучасних умовах.
2. Обґрунтована ефективність та доцільність широкого застосування технології ультразвукового кавітаційного знезараження питної води.
3. Запропоновані оригінальні технічні рішення для подальшого підвищення ефективності ультразвукового кавітаційного технологічного обладнання для знезараження рідин.

Список використаних джерел

1. <https://countrymeters.info/ru/World>
2. Howard G. Domestic Water Quantity, Service Level and Health / G. Howard, J. Bartram. – Geneva, Switzerland: World Health Organization (WHO), 2003. – 39 с.

3. Жажда мира: как скоро на нашей планете кончится пресная вода? [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://rusfilter.ru/blog/voprosy-o-vode/zhazhda-mira-kak-skoro-na-nashei-planete-konchitsja-presnaja-voda/>
4. Савлук О.С. Обеззараживание питьевой воды / О.С. Савлук, Н.Г. Потапченко, В.Н. Косинова // Химия и технология воды. – 1998. – Т. 20, №1. – С. 99 – 111.
5. Петренко Н.Ф. Диоксид хлора: применение в технологиях водоподготовки / Н.Ф. Петренко, А.В. Мокиенко. – Одесса.: Optimum, 2005. – 486 с.
6. Савлук О.С. Интенсификация обеззараживания воды гипохлоритом натрия в присутствии ионов меди или серебра / О.С. Савлук, И.П. Томашевская, В.Н. Косинова // Химия и технология воды. – 1990. – Т. 12, – № 1. – С. 74 – 78.
7. Мокиенко А.В. Галогенсодержащие соединения (ГСС) как продукты хлорирования воды. Сообщение первое. Краткая история вопроса и общее состояние проблемы (часть 1) / А.В. Мокиенко, Н. Ф. Петренко, А.И. Гоженко / Актуальные проблемы транспортной медицины. – 2011. – № 4 (26). С. 36 – 49.
8. Ультразвук. Маленькая энциклопедия / Глав. ред. И. П. Голямина. - М.: Советская энциклопедия, 1979. – 400 с.
9. Луговской А.Ф. Ультразвуковая кавитация в современных технологиях / А. Ф. Луговской, Н. В. Чухраев. - К. : ВПЦ «Київ. ун-т», 2007. - 244 с.
10. Ультразвуковий пристрій для обробки рідини. Патент України на винахід № 120803, Опубл. 10.02.2020, Бюл. № 5/ О.Ф. Луговський, А.В. Мовчанюк, І.А. Гришко, В.П. Фесич та інш.
11. Мобільний ультразвуковий пристрій для обробки рідини. Патент України на корисну модель № 144597, Опубл. 12.10.2020, Бюл. № 19. / О.Ф. Луговський, І.М. Бернік, А.В. Мовчанюк, І.А. Гришко та інш.
12. Розина Е. Ю. Кавитационный режим звукокапиллярного эффекта / Е. Ю. Розина // Акустичний вісник / Е. Ю. Розина. – Одесская государственная академия холода, 2003. – (6). – (ISSN 1028 -7507). – С. 48 – 59.
13. ОЧИСТКА ВОДЫ БЕЗ ПРИМЕНЕНИЯ ХЛОРА: ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ЭКОНОМИЯ [Электронный ресурс]. – 2017. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.anapa-bassein.ru/articles/20>