

ДУШЕНКО ОЛЕКСАНДР

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

ТКАЧУК ВІТАЛІЙ

Хмельницький національний університет  
<https://orcid.org/0000-0003-0640-2740>  
email: [tkachukv.p@gmail.com](mailto:tkachukv.p@gmail.com)

## ОБЛАДНАННЯ ВХІДНОЇ МАГНІТНО-КАВІТАЦІЙНОЇ ПІДГОТОВКИ ВОДИ ДЛЯ ТЕПЛОМЕРЕЖ

*Якщо не організована якісна водопідготовка для котлів, то 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. 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 попередню її оброблення гідрокавітацією та магнітним полем з метою пом'якшення та зміни властивостей. Сутність роботи запропонованого обладнання полягає в тому, що вплив звукової гідрокавітації та змінного магнітного поля на воду зводиться до єдиного процесу – розщепленню молекул води у кавітаційній порожнині на активні радикали. Запропоновано конструкцію обладнання вхідної магнітно-кавітаційної підготовки води з додатковим гідрокавітаційним впливом на воду при зворотно-поступальному руху рідини крізь насадок, що поєднує сумарно ефекти розриву водневих зв'язків у молекулах води, окисленню іонів заліза та кальцію, збільшення показника Рн.*

*Ключові слова: гідрокавітація, магнітна обробка води, обладнання, покращення якості води.*

DUSHENKO OLEKSANDR, TKACHUK VITALIY  
Khmelnitskyi National University

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

*If high-quality water treatment for boilers is not organized, the 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 the pipes, significantly reducing their internal diameter. This causes the failure of shut-off valves and pumping equipment: hardness salts and other poorly soluble salts (carbonates, magnesium and calcium sulfates, silicates, various compounds of copper and manganese) settle, creating a crust on the metal walls of the equipment, which reduces its heat output. This contributes to a reduction in boiler power, increases energy costs, and significantly shortens the life of the equipment. Based on the analysis of the latest research, it is proposed to improve the quality and composition of water that comes from municipal water supply, artesian wells and reservoirs, before filtering and deaerating water, it is proposed to pre-treat it with hydrocavitation and a magnetic field in order to soften and change its properties. The essence of the operation of the proposed equipment is that the effect of sound 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 various processes, namely hydrocavitation and magnetic influence on the passage of chemical reactions, breaking of hydrogen bonds in water molecules, is considered. The design of the equipment for the incoming magnetic cavitation preparation of water with an additional hydrocavitation effect on water during the reciprocating movement of the liquid through the nozzle is proposed, which combines the effects of breaking hydrogen bonds in water molecules, oxidation of iron and calcium ions, increasing the Pn indicator, and after its after settling, it is fed to the ion exchange and deaeration units, and later to the heating mains.*

*Key words: hydrocavitation, magnetic water treatment, equipment, water quality improvement.*

### Постановка проблеми

Термін служби обладнання котелень багато в чому залежить від фізичних і хімічних властивостей води. Низька якість води, а також відсутність необхідного контролю та хімічної корекції води в теплових мережах, пароконденсатних трактах і котлах сприяють утворенню накипу, кисневої та вуглекислотної корозії. В результаті відбувається зниження теплопередачі, забивання устаткування і зменшення терміну його служби, зниження рентабельності і навантаження, збільшення частоти простоїв.

Для обладнання котелень найбільш небезпечна вода з високим вмістом розчинених забруднювачів, а саме, солей жорсткості, таких як солі кальцію і магнію. Одне з властивостей солей жорсткості визначається їх здатністю осідати й утворювати на внутрішніх поверхнях обладнання шар накипу [1]. У свою чергу, накип сприяє зниженню теплопровідності металів, і тоді щоб досягти потрібних результатів роботи котельні, необхідно значно збільшити витрату електроенергії. Єдиний метод, що дозволяє на сьогоднішній день ефективно запобігати утворенню накипу, полягає в попередньому очищенні води від розчинених домішок, що містяться в ній.

Водопідготовка для котелень – це процес, який полягає в тому, що воду, перед тим як подати в котельню, попередньо обробляють. До системи попереднього очищення води обов'язково входять кілька блоків-фільтрів, за допомогою яких видаляються з води як розчинені забруднювачі типу мінеральних солей, так і грубо-дисперсні механічні домішки.

Перший етап водопідготовки особливої складності не становить, і зазвичай під час його проведення використовують стандартні фізичні методи водоочищення, 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 котелень полягає в застосуванні мембранних технологій - зворотний осмос та ультрафільтрація.

Стадії водопідготовки в котельнях у загальному мають наступний вигляд : попереднє очищення від колоїдів, суспензій, заліза, органіки; демінералізація або пом'якшення; видалення агресивних газів  $\text{CO}_2$  і  $\text{O}_2$ ; корекційна обробка.

Типові помилки водопідготовки в котельнях це: відсутність або неефективність попередньої очистки; установки пом'якшення індивідуально не розраховуються, не на всіх котельнях є деаератори, а там, де вони є, не завжди налагоджені; практично ніде не ведуть корекційну обробку води.

Джерелами водопостачання для котелень є муніципальне водопостачання, артезіанські свердловини і водойми. Зазвичай, водопровідна вода подається на систему водопідготовки для підживлення тепломереж і котлів без будь-якої попередньої очистки. Якщо вода хлорована, то при використанні зворотного осмосу або хімічного знесолювання, воду необхідно дехлорувати повністю, оскільки під впливом хлору руйнуються аніоніти і зворотні осмотичні мембрани.

У водах з підземних джерел зазвичай підвищений вміст іонів заліза, що також може бути і у водопровідній воді в результаті корозії труб. Велика концентрація іонів заліза сприяє заростанню осадку в мембрані, внаслідок чого необхідна частіша кислотна промивка, яка зменшує термін їх служби.

Наявність органіки і суспензій в живильній воді котлів сприяє виникненню корозії і відкладень в трубопроводах і на поверхнях нагріву. Крім цього, органічні речовини знижують не зворотно обмінну ємність аніонітів і викликають деградацію і обростання зворотно-осмотичних мембран.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Розглянемо роботу основних блоків існуючого обладнання водопідготовки. Очищення води відбувається шляхом іонного обміну через іономісткі фільтри: під час Na-катіонування іони  $\text{Mg}^{2+}$  та  $\text{Ca}^{2+}$ , що містяться у воді, обмінюються на катіони  $\text{Na}^+$  у катіонітовому камені відповідно до концентраційних констант обміну. Таким чином, Na-катіонування знижує жорсткість, один з основних технічних показників. Зазвичай, Na-катіонітні фільтри використовуються лише для зниження жорсткості очищеної води. Якщо всі катіонні солі спочатку належать до типу Na, то під час роботи фільтра катіони жорсткості більше не присутні у фільтраті. Поява катіонів жорсткості у фільтраті пов'язана з наближенням концентраційного фронту катіонів жорсткості до нижніх шарів катіоніту. Робота Na-катіонітового фільтра зазвичай припиняється, коли концентрація катіонів жорсткості у фільтраті досягає заданої концентрації. При цьому, навіть якщо завантаження Na-катіонітового фільтра частково завантажене катіонами жорсткості на початку робочої фази, під час роботи фільтра катіони, що вивільняються з верхнього шару, регенерують катіоніти в нижньому шарі, збагачуючи фільтрат катіонами кальцію і магнію. Цей процес триває до тих пір, поки, згідно з теорією динаміки іонного обміну в гетерогенних умовах, кількість катіонів жорсткості не буде відповідати концентрації іонів, вивільнених з катіонітів у верхньому шарі. В даному випадку, отже, початкова частина фільтрату містить певну кількість катіонів жорсткості, яка потім зменшується за межами аналізованого значення. У міру наближення концентраційного фронту іонів твердості до нижнього шару іоніту концентрація катіонів твердості у фільтраті починає зростати.

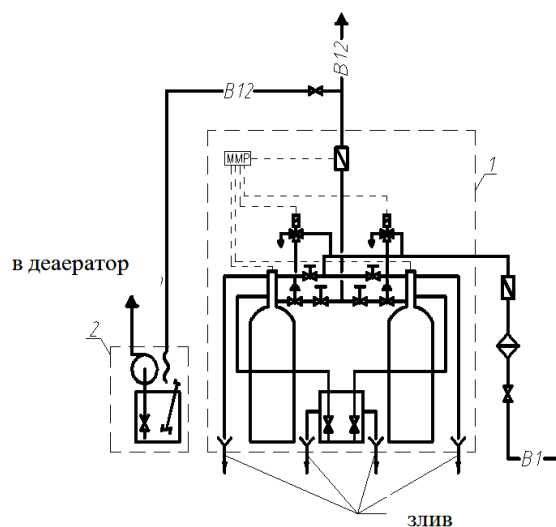


Рис. 1. Принципова схема водопідготовки: B1 – сира вода з водопроводу; B12 – хімічно очищена вода; 1 – установка зм'якшування води; 2 – дозуюча установка

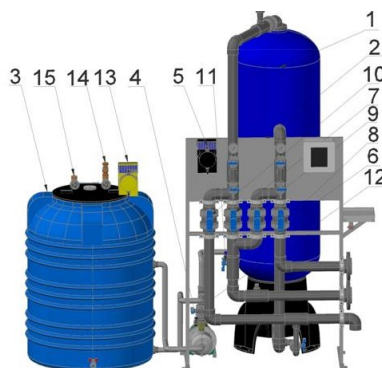
Під час тривалої експлуатації іоніт з низькою осмотичною силою подрібнюється. Ці частинки потрапляють в проміжки між частинками фільтруючого матеріалу, викликаючи зменшення пористості фільтруючого шару і збільшення гідралічного опору. Тому після закінчення робочої фази проводиться розпушування фільтруючого шару, в результаті чого фільтруючий шар змінюється з щільного на пухкий і

одночасно видаляються подрібнені частинки. Під час розпушування зерна іоніту піднімаються потоком води вгору і, пройшовши певну відстань, падають вниз. В результаті частинки, які раніше знаходилися у верхньому шарі, опускаються в нижній шар. Таким чином, в пухкому шарі іоніту зерна різних іонних форм більш-менш розподілені по висоті шару іоніту.

Для відновлення обмінної ємності відпрацьованого іоніту відбувається регенерація; при Натіонуванні для регенерації використовується розчин хлориду натрію. Регенерація здійснюється шляхом пропускання регенованого розчину через шар відпрацьованого та розпушеного іоніту. Розрізняють регенерацію постійним струмом і протитечійну регенерацію. Прямоточна регенерація - це процес регенерації, при якому регенераційний розчин пропускається через шар іоніту в напрямку подачі очищеної води на фільтр. Протитечійна регенерація - це процес регенерації, при якому регенеруючий розчин пропускається проти течії оброблюваної води. При реальному очищенні води іоніт повинен бути відновлений якомога повніше. Один з найпростіших способів досягти цього - безперервне пропускання регенераційного розчину через шар іоніту. Фаза регенерації завжди вимагає коротшого часового інтервалу, ніж фаза експлуатації, і чим більша різниця в часі між цими фазами, тим краще структурований процес очищення з технічної точки зору. Короткий час регенерації досягається за рахунок використання відносно високих концентрацій регенераційного розчину.

Після завершення регенерації іонізатор очищається. Під час процесу очищення з іонізатора видаляється як продукт регенерації, так і регенерант. Процес очищення іонізатора зазвичай починається відразу після проходження регенераційної рідини, коли частина регенераційної рідини залишається у фільтрі. Після проходження регенераційної рідини залишки повністю видаляються через нижню дренажну систему. Фільтр заповнюється промивною водою знизу до верхнього рівня фільтруючого матеріалу. Потім промивна вода подається зверху, утворюючи звичайну водяну подушку. Після цієї операції промивна вода починає текти приблизно з тією ж швидкістю, що і швидкість потоку регенованої рідини.

Деаерація води – це вилучення із води агресивних газів ( $O_2$  і  $CO_2$ ), що зумовлюють процес корозії металів. Хімічна дегазація дешевша і простіша, ніж вакуумна, і в останні роки широко використовується для підготовки живильної води водогрійних котлів і підживлювальної води для теплових мереж. При хімічній деаерації у воду подається сульфід натрію, який вступає в хімічну реакцію з розчиненим у воді киснем.



**Рис. 2.** Загальний вигляд дозуючої станції: 1 – корпус фільтра; 2 – рама; 3 – бак розчину сульфату натрію; 4 – циркуляційний насос; 5 – насос дозатор стабілізаційного розчину; 6, 12 – шаровий кран DN 25; 7, 8, 9, 10 – шаровий кран DN 40; 11 – лічильник холодної води; 13 – насос дозатор розчину сульфату натрію; 14, 15 – шарові крани DN 15

За останні роки технологія гідродинамічної кавітації (ГК) привертає інтерес наукової спільноти до очищення води. У ГК мікронано бульбашки водяної пари при низькому тиску утворюються шляхом пропускання води через пластини з отворами та трубки Вентурі [2]. Утворення, ріст і бурхливе згорання бульбашок призводить до вивільнення великої кількості енергетичних «гарячих точок», ударних хвиль і мікроструменів, які можуть розщепити або розщепити органічні речовини, присутні в рідині. Крім того, високореактивні гідроксильні радикали ( $OH\cdot$ ), що утворюються в ГК, можуть розкладати широкий спектр стійких забруднюючих речовин [3]. Ефективність ГК підвищується, коли вона поєднується з іншими процесами, наприклад, аерацією, оксигенацією та фентоном [4-6], ультразвуком [7], УФ [8], озоном [9] і плазмою [10]. Деякі переваги ГК - це простота конструкції, низька вартість, висока енергоефективність і легка масштабованість [5, 11, 12]. Очищення стічних вод за допомогою мембранної фільтрації здійснюється в основному на третинному етапі, і використання керамічних мембран (КМ) в останні роки зросло. Деякі переваги КМ по відношенню до полімерних мембран: стійкість до забруднення, робота при високих температурах і можливість більш тривалого циклу фільтрації [13]; однак вони дорожчі. Крім того, мембрани дозволяють ефективно видаляти загальну кількість завислих речовин, наприклад, як повідомляється для стічних вод бійні з використанням неорганічної мембрани з розміром пор 0,13 мкм [14]. Мембранна

технологія також може бути інтегрована в біологічні процеси для одночасного культивування мікроводоростей і очищення стічних вод у занурених мембранних фотобіореакторах [15, 16].

Одним із визнаних багатообіцяючих нетрадиційних методів є гідродинамічна кавітація, яка була пов'язана виключно з інженерними проблемами, такими як шум, вібрація та кавітаційна ерозія (індикатори зниження ефективності машини). Проте в останнє десятиліття ГК була широко визнана як можливий метод очищення стічних вод завдяки ефективному руйнуванню складних органічних хімічних речовин, нехімічній природі, хорошій сумісності з іншими прогресивними процесами окислення, простоті експлуатації, чудовому створенню необхідної інтенсивності кавітації. умови, можливе застосування в пілотному масштабі, хороші експериментальні результати та економічні аспекти [17-22].

За останні роки з'явилося багато досліджень застосування кавітаційних процесів та обладнання для проведення звукохімічних реакцій у воді [23, 24]. Дослідженнями [25, 26] показано вплив змінного магнітного поля на проходження різних хімічних реакцій та зміну властивостей води та її складу. На теперішній час існують інноваційні способи та конструкції для магнітної обробки рідини, реструктуризації та очищення рідини [27-30].

#### Актуальність дослідження

Метою цієї роботи є розроблення конструкції обладнання для підвищення ефективності попередньої магнітно-кавітаційної підготовки води котелень для зменшення утворення накипу, кисневої та вуглекислотної корозії в теплових мережах та підвищення теплопередачі системи.

#### 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 та магнітним полем з метою пом'якшення та зміни 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.

Дія звукового поля на речовини, що проникають у кавітаційну порожнину, є безпосередньою прямою, причому дія активних газів  $O_2$ ,  $H_2$  беруть участь у реакціях трансформування радикалів, а  $N_2$  - у газових звукохімічних реакціях, кінцевим результатом яких є фіксація азоту.

При сплескуванні кавітаційного пухирця в розчин переходять радикали  $H^+$ ,  $OH^-$ , іони й електрони малої енергії, що утворилися в газовій фазі при розщепленні молекули  $H_2O$ , а також метастабільні збуджені молекули  $H_2O$ .

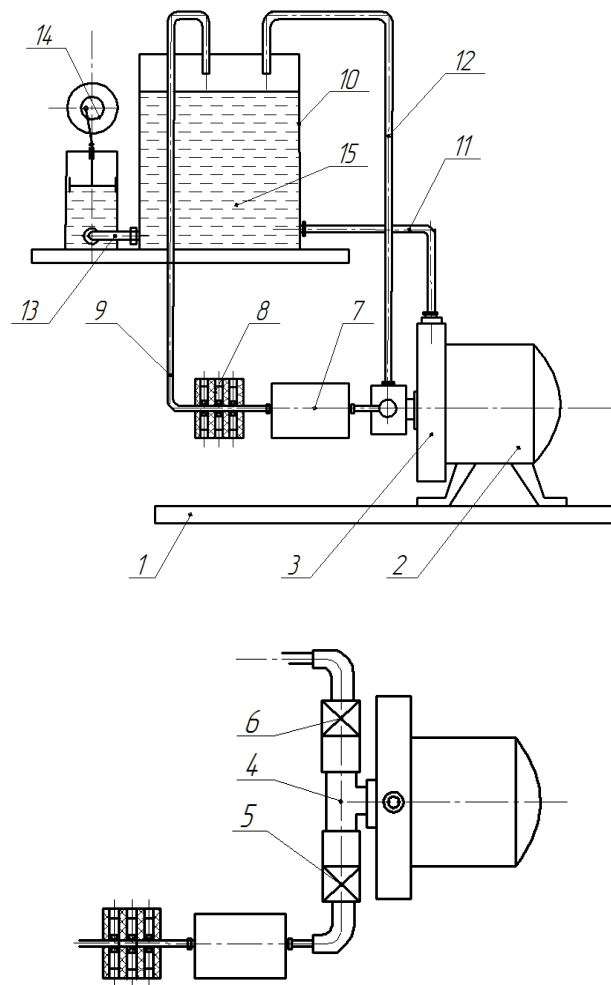
Для підвищення ефекту розщеплення молекул води введено додатковий пристрій для омагнічування потоку рідини. Велике значення має довжина зон впливу магнітних полів на потік рідини, а також індукція магнітного поля. Зовнішнє магнітне поле викликає ларморову прецесію електронних орбіталей і ядер, а також поляризацію електронних оболонок в молекулах води, завдяки чому останні набувають індукований момент, антипаралельний до зовнішнього поля. Внаслідок цього виникає асиметрія коливань, енергія водневих зв'язків змінюється, відбувається їх частковий розрив, що спричиняє зміну взаємного розміщення молекул, а отже, і структури води. На орієнтацію молекул і розподіл зв'язків між ними помітно впливають електричні поля, які виникають внаслідок зміни магнітної індукції при переміщенні молекул через зони дії магнітних полів. При підвищенні величини індукції зовнішнього магнітного поля поляризація електронних хмарин (атомна і орієнтаційна поляризація) посилюється, кількість розірваних водневих зв'язків зростає і збільшується кількість молекул, що зійшли з положення рівноваги у вузлах квазикристалічної ґратки і потрапили в пустоти. Під дією магнітного поля перш за все розриваються слабкі "довгі" зв'язки.

Практично у всіх конструкціях апаратів, призначених для магнітної обробки води, магнітне поле змінюється від нуля, або від близької до нуля величини і до певного оптимального значення. Тому поміж полюси постійного магніту було поміщено вставку, яка складалася з конусоподібних магнітопроводів, поміж яких проходила трубка з розчином [31]. Завдяки такій будові феромагнітної вставки, магнітне поле концентрується у вершині конуса і його індукція досягає 600 мТ. Таким чином, розчин перетинає вузькі зони магнітного поля з індукцією 600 мТ на фоні постійного поля з індукцією 300 мТ.

Значний вплив на зміну властивостей вод та її склад дає циклічна гідро кавітація у вібраційних машинах при зворотно-поступальному руху рідини крізь насадок [32-34].

Виходячи з аналізу попередніх досліджень, патентного огляду способів та конструкцій пристроїв для очищення, пом'якшення і зміни властивостей води було запропоновано поєднати можливості гідрокавітаційної та магнітної обробки води для котелень та створити технологічне обладнання для попередньої її підготовки.

Принципова схема обладнання магнітно-кавітаційної підготовки води для тепломереж представлена на кресленіку рис. 1. У конструкції обладнання поєднано кавітаційний та магнітний вплив на воду та зворотно-поступальний рух рідини крізь насадок із виникнення кавітаційного процесу.



**Рис. 3.** Принципова схема обладнання вхідної магнітно-кавітаційної підготовки води для тепломреж: 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 – поршневий кавітатор ексцентрикового типу; 15 – вода

Обладнання магнітно-кавітаційної підготовки води містить: основу 1 на якій встановлено електродвигун з насосом 3. На виході з насоса встановлено трійник 4 на якому вкручено кулькові крани 5,6 для регулювання процесу виникнення кавітації у статичному кавітаторі 7, який з'єднаний трубопроводом з блоком постійних магнітів 8. Трубопровід 9 з блока постійних магнітів 8 подає воду у бак 10. Трубопровід 11 з'єднаний з баком 10 та входом у насос та призначений для забору води 15 з бака 10. Трубопровід 12 з'єднано через трійник 4 та кран 6 з баком 10 для зливу води 15 та регулювання тиску у кавітаторі 7. До баку 10 у нижній частині приєднано з допомогою трубопроводу 13 поршневий кавітатор 14 ексцентрикового типу.

Обладнання магнітно-кавітаційної підготовки води працює наступним чином. Вода 15 заливається у бак 10 після чого включається електродвигун 2 який приводить у дію насос 3. Вода 15 крізь трійник 4 поступає у магістралі та регулюється кранами 5,6 для досягнення кавітаційного процесу у статичному кавітаторі 7, перетікаючи крізь блок постійних магнітів 8 та трубопроводом 9 подається у бак 10. Надлишок води 15 крізь трубопровід 12 вертається у бак 10.

Також при включенні вібраційного поршневого кавітатора ексцентрикового типу 14 вода 15 додатково підлягає кавітаційному впливу при зворотно-поступальному руху рідини крізь насадок та циклічно подається крізь трубопровід 13 у бак 10.

Після 20-30 хвилин оброблення води за допомогою насоса 3 вода зливається у ємність для відстоювання протягом 2-3 діб. Після чого вода подається на блоки очищення, іонного обміну, деаерація води.

Процеси які проходять в обладнанні попередньої магнітно-кавітаційної підготовки 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 гідрооксидів  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , які з часом випадають в осад і тому зменшується загальна концентрація вмісту розчинених речовин, зростає показник рН за період оброблення, що говорить про розрив водневих зв'язків у молекулах води, зменшується коефіцієнт поверхневого натягу [35].

Таким чином, застосування запропонованого обладнання попередньої магнітно-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.

У результаті проведеного аналізу досліджень застосування кавітаційно-магнітного впливу на зміну властивостей води та її складу, а також запропонованої конструкції устаткування у подальших дослідженнях необхідно вирішити наступні завдання: визначення конструктивних параметрів пристрою для магнітного впливу; визначення конструктивних параметрів та величини вхідного тиску рідини та швидкість проходження крізь статичний кавітатор, визначення конструктивних параметрів поршневого кавітатора та режимів його роботи.

### Висновки

Якщо не організована якісна водопідготовка для котлів, то 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 стає причиною виходу з ладу запірної арматури та насосного обладнання: солі жорсткості та інші слаботорозчинні солі (карбонати, сульфати магнію та кальцію, силікати, різні сполуки міді та марганцю) осідають, створюючи на металевих стінках обладнання кірку, що знижує його тепловіддачу. Це сприяє зниженню потужності котлів, збільшуються витрати на енергоресурси та значно скорочується термін експлуатації обладнання.

Запропоновано конструкцію обладнання вхідної магнітно-кавітаційної підготовки води з додатковим гідрокавтаційним впливом на воду при зворотно-поступальному руху рідини крізь насадок, що поєднує сумарно ефекти розриву водневих зв'язків у молекулах води, окисленню іонів заліза та кальцію, збільшення показника  $R_n$ , а після її відстоювання вона подається у блоки іонного обміну та деаерації і у подальшому у магістраль тепломереж.

### Література

1. Павлов Є., Ліфанов О. Зміна якості питної води і опору трубопроводу при транспортуванні її по водопровідних трубах. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. К.: КНУБА, 2022, вип. 38, С. 50-54.
2. Gogate, P.R.; Pandit, A.B. A Review and Assessment of Hydrodynamic Cavitation as a Technology for the Future. *Ultrason. Sonochem.* 2005, 12, С. 21–27.
3. 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.
4. Thanekar, P.; Panda, M.; Gogate, P.R. Degradation of Carbamazepine Using Hydrodynamic Cavitation Combined with Advanced Oxidation Processes. *Ultrason. Sonochem.* 2018, 40, С. 567–576.
5. 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, С. 375–381.
6. 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.
7. 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, С. 156–165.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Wang, B.; Su, H.; Zhang, B. Hydrodynamic Cavitation as a Promising Route for Wastewater Treatment—A Review. *Chem. Eng. J.* 2021, 412, 128685.
12. 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.
13. Zsirai, T.; Al-Jaml, A.K.; Qiblawey, H.; Al-Marri, M.; Ahmed, A.; Bach, S.; Watson, S.; Judd, S. Ceramic Membrane Filtration of Produced Water: Impact of Membrane Module. *Sep. Purif. Technol.* 2016, 165, С. 214–221.
14. Goswami, K.P.; Pugazhenthii, G. Treatment of Poultry Slaughterhouse Wastewater Using Tubular Microfiltration Membrane with Fly Ash as Key Precursor. *J. Water Process Eng.* 2020, 37, 101361.
15. Solmaz, A.; Işık, M. Optimization of Membrane Photobioreactor; the Effect of Hydraulic Retention Time on Biomass Production and Nutrient Removal by Mixed Microalgae Culture. *Biomass Bioenergy.* 2020, 142, 105809.



16. Terán Hilares, R.; Garcia Bustos, K.A.; Sanchez Vera, F.P.; Colina Andrade, G.J.; Pacheco Tanaka, D.A. Acid Precipitation Followed by Microalgae (*Chlorella vulgaris*) Cultivation as a New Approach for Poultry Slaughterhouse Wastewater Treatment. *Bioresour. Technol.* 2021, 335, 125284.
17. Gałol, M.; Przyjazny, A.; Boczkaj, G. Wastewater Treatment by Means of Advanced Oxidation Processes Based on Cavitation—A Review. *Chem. Eng. J.* 2018, 338, C. 599–627.
18. Gogate, P.R. Cavitation: An Auxiliary Technique in Wastewater Treatment Schemes. *Adv. Environ. Res.* 2002, 6, 335–358.
19. 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, C. 222–230.
20. Montalvo Andia, J.P.; Ticona Cayte, A.E.; Illachura Rodriguez, J.M.; López Belón, L.; Cárdenas Málaga, M.A.; Teixeira, L.A.C. Combined Treatment Based on Synergism between Hydrodynamic Cavitation and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> for Degradation of Cyanide in Effluents. *Miner. Eng.* 2021, 171, 107119.
21. Fedorov, K.; Sun, X.; Boczkaj, G. Combination of Hydrodynamic Cavitation and SR-AOPs for Simultaneous Degradation of BTEX in Water. *Chem. Eng. J.* 2021, 417, 128081.
22. Kadam, S.R.; Jadhav, N.L.; Pandit, A.B.; Pejaver, M.K. Degradation Kinetics and Mechanism of Hazardous Metribuzin Herbicide Using Advanced Oxidation Processes (HC & HC+ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). *Chem. Eng. Process.-Process Intensif.* 2021, 166, 108486.
23. 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.
24. 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.
25. Кочетов Г., Самченко Д., Архатенко Т. Визначення впливу рН реакційної суміші процесу феритації з електромагнітною імпульсною активацією на переробку гальванічного шламу. *Східно-Європейський журнал підприємницьких технологій.* 2021. 4/10 (112). С. 24–30.
26. Сілін Р. І., Баран Б. А., Гордєєв А. І. Властивості води та сучасні способи її очищення : монографія. Хмельницький : ХНУ, 2009. 254 с.
27. Пристрій для магнітного очищення рідини. №44324. МПК C02F 1/48 u200905451. Заявл. 25.09.2009; Опубл. 25.09.2009, Бюл. № 18.
28. Пристрій для магнітної обробки рідини. № 53027. МПК 7C02F1/48 2002020999. Заявл. 07 02 2002; Опубл. 15 01 2003, Бюл. № 1.
29. Спосіб магнітного очищення рідини. №63071 МПК C02F 1/48; u201102539. Заявл. 03.03.2011. Опубл. 26.09.2011, Бюл. № 18.
30. Спосіб реструктуризації та очищення рідини. №123178 МПК C02F 1/36 u 2017 09677. Заявл. 03.10.2017. Опубл. 12.02.2018, Бюл. № 3.
31. Баран Б. А., Дроздовський В. Б. Вплив конфігурації магнітного поля на іонний обмін. Частина III. Вісник технологічного університету Поділля. 1999. № 6. С. 174–177.
32. 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.
33. 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.
34. 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.* Vol. 23. Is.4. 2021. pp.799–809.
35. Костюк Н. О., Гордєєв А. І., Гордєєв О. А. Обґрунтування динамічних та конструктивних параметрів вібраційної машини для знезаражування та зміни властивостей води. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. №6. 2019. С. 40–47.

#### References

1. Pavlov E., Lifanov O. Changes in the quality of drinking water and pipeline resistance during its transportation through water pipes. *Problems of water supply, drainage and hydraulics.* K.: KNUBA, 2022, issue 38, pp. 50–54.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.

8. 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.
9. 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.
10. 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. *Ultrasound. Sonochem.* 2021, 70, 105323.
11. Wang, B.; Su, H.; Zhang, B. Hydrodynamic Cavitation as a Promising Route for Wastewater Treatment—A Review. *Chem. Eng. J.* 2021, 412, 128685.
12. 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. *Ultrasound. Sonochem.* 2020, 63, 104931.
13. Zsirai, T.; Al-Jaml, A.K.; Qiblawey, H.; Al-Marri, M.; Ahmed, A.; Bach, S.; Watson, S.; Judd, S. Ceramic Membrane Filtration of Produced Water: Impact of Membrane Module. *Sept. Purif. Technol.* 2016, 165, pp. 214–221.
14. Goswami, K.P.; Pugazhenth, G. Treatment of Poultry Slaughterhouse Wastewater Using Tubular Microfiltration Membrane with Fly Ash as Key Precursor. *J. Water Process Eng.* 2020, 37, 101361.
15. Solmaz, A.; Işık, M. Optimization of Membrane Photobioreactor; the Effect of Hydraulic Retention Time on Biomass Production and Nutrient Removal by Mixed Microalgae Culture. *Biomass Bioenergy.* 2020, 142, 105809.
16. Terán Hilares, R.; Garcia Bustos, K. A.; Sanchez Vera, F.P.; Colina Andrade, G.J.; Pacheco Tanaka, D.A. Acid Precipitation Followed by Microalgae (*Chlorella vulgaris*) Cultivation as a New Approach for Poultry Slaughterhouse Wastewater Treatment. *Bioresour. Technol.* 2021, 335, 125284.
17. 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.
18. Gogate, P.R. Cavitation: An Auxiliary Technique in Wastewater Treatment Schemes. *Adv. Environ. Res.* 2002, 6, pp. 335–358.
19. 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, 222–230.
20. Montalvo Andia, J.P.; Ticona Cayte, A.E.; Illachura Rodriguez, J.M.; López Belón, L.; Cárdenas Málaga, M.A.; Teixeira, L.A.C. Combined Treatment Based on Synergism between Hydrodynamic Cavitation and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> for Degradation of Cyanide in Effluents. *Miner. Eng.* 2021, 171, 107119.
21. Fedorov, K.; Sun, X.; Boczkaj, G. Combination of Hydrodynamic Cavitation and SR-AOPs for Simultaneous Degradation of BTEX in Water. *Chem. Eng. J.* 2021, 417, 128081.
22. Kadam, S.R.; Jadhav, N.L.; Pandit, A.B.; Pejaver, M.K. Degradation Kinetics and Mechanism of Hazardous Metribuzin Herbicide Using Advanced Oxidation Processes (HC & HC+ H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>). *Chem. Eng. Process.-Process Intensif.* 2021, 166, 108486.
23. Petkovšek, M.; Mlakar, M.; Levstek, M.; Stražar, M.; Širok, B.; Dular, M. A Novel Rotation Generator of Hydrodynamic Cavitation for Waste-Activated Sludge Disintegration. *Ultrasound. Sonochem.* 2015, 26, pp. 408–414.
24. 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.
25. Kochetov G., Samchenko D., Arkhatenko T. Determination of the influence of the pH of the reaction mixture of the ferritization process with electromagnetic pulse activation on the processing of galvanic sludge. *East European Journal of Entrepreneurial Technologies.* 2021. 4/10 (112). P. 24–30.
26. Silin R. I., Baran B. A., Gordeev A. I. Properties of water and modern methods of its purification: monograph. Khmelnytskyi: KhNU, 2009. 254 p.
27. Device for magnetic liquid cleaning. № 44324. IPC C02F 1/48 u200905451. Appl. 09/25/2009; Publ. 25.09.2009, Bull. № 18.
28. Device for magnetic treatment of liquid. № 53027. IPC 7C02F1/48 2002020999. Appl. 07 02 2002; Publ. 15 01 2003, Bull. № 1.
29. The method of magnetic liquid cleaning. № 63071 IPC C02F 1/48; u201102539. Appl. 03.03.2011. Publ. 26.09.2011, Bull. № 18.
30. The method of liquid restructuring and purification. №123178 IPC C02F 1/36; u 2017 09677. Application 03.10.2017. Publ. February 12, 2018, Bull. № 3.
31. Baran B. A., Drozdovskiy V. B. Influence of magnetic field configuration on ion exchange. Part III. *Bulletin of Podillia University of Technology.* 1999. № 6. pp. 174–177.
32. Vibrating machines for disinfection and changing the properties of water / A. I. Gordeev, A. L. Hanzhuk, N. O. Kostyuk, et al. Khmelnytskyi: FOP "Melnyk", 2021. 168 p.
33. 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. № 6 2022. pp. 427–439.
34. 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.* Vol. 23. Is.4. 2021. pp. 799–809.
35. Kostyuk N.O., Gordieiev A.I., Gordieiev O.A. Justification of dynamic and structural parameters of a vibrating machine for disinfection and changing water properties. *Herald of Khmelnytskyi National University.* № 6. 2019. pp. 40–47.