

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: tkachuk.v.p@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ІЗ ЗМІННОЮ ІНДУКЦІЄЮ ПО ДОВЖИНІ ОСІ ПОТОКУ НА СКЛАД ТА ВЛАСТИВОСТІ ВОДИ ДЛЯ ТЕПЛОМЕРЕЖ

Не достатньо якісна водопідготовка для котлів, іони речовин та металів, що присутні в неочищеній воді, призводять до утворення накипу, іржі, наявність глини та піску призводить до зменшення внутрішнього діаметру труб. Це призводить до виходу з ладу запірної арматури та насосного обладнання. Солі жорсткості та інші важкорозчинні солі (різні сполуки міді та марганцю, карбонати, сульфати магнію та кальцію, силікати) осідають на стінках у вигляді міцної кірки, що викликає зменшення тепловіддачі. З аналізу джерел встановлено, що магнітне поле, яке може створюватися електромагнітами або постійними магнітами, значно впливає на зміну властивостей та склад води, а обладнання та пристрої повинні мати змінну індукцію магнітного поля вздовж проходження води, що досягається певними відстанями між магнітами. Розроблено експериментальну установку циклічного магнітного впливу на воду, що підвищує ефект розриву водневих зв'язків у молекулах води, окисленню іонів заліза та кальцію, збільшення показника Рн. Дослідженнями кристало-оптичного аналізу структури висушеної краплі води після оброблення магнітним полем підтверджено, що отримується більш структурований стан та зменшується сила поверхневого натягу води, підвищується показчик Рн. Також було проведено дослідження термостатичні вимірювання кипіння дистильованої води.

Ключові слова: водопідготовка, магнітне поле, обладнання, показчики води.

DUSHENKO OLEKSANDR, TKACHUK VITALIY

Khmelnytskyi National University

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF A MAGNETIC FIELD WITH VARIABLE INDUCTION ALONG THE LENGTH OF THE FLOW AXIS ON THE COMPOSITION AND PROPERTIES OF WATER FOR HEATING NETWORKS

Poor-quality water treatment for boilers and contaminants present in untreated water lead to a number of problems: large colloidal and mechanical contaminants in the form of scale, rust, clay or sand quickly clog pipes, significantly reducing their internal diameter. This leads to failure of shut-off valves and pumping equipment: hardness salts and other poorly soluble salts (carbonates, magnesium and calcium sulfates, silicates, various copper and manganese compounds) settle, forming a crust on the metal walls of the equipment, which reduces its heat transfer. The main directions of building the design of electromagnetic and magnetic devices for the influence of a magnetic field on water and water systems are considered. From the analysis of sources, it was established that the magnetic field, which can be created by electromagnets or permanent magnets, significantly affects the change in the properties and composition of water, and equipment and devices must have a variable magnetic field induction along the passage of water, which is achieved by certain distances between the magnets. The study of the performance of the proposed design of equipment for water preparation for heating networks, with multi-cyclic time-dependent magnetic field effects on water, is an urgent scientific and technical task. An experimental installation of cyclic magnetic effects on water has been developed, which enhances the effect of breaking hydrogen bonds in water molecules, oxidation of iron and calcium ions, and increasing the pH index. The study of the effect of a magnetic field on water hardness and structural state has been conducted. Studies of crystal-optical analysis of the structure of a dried water drop after treatment with a magnetic field have confirmed that a more structured state is obtained and the surface tension coefficient of water decreases, and the pH index increases. A study was also conducted on thermostatic measurements of the boiling point of distilled water.

Key words: water treatment, magnetic field, equipment, water indicators.

Стаття надійшла до редакції / Received 18.06.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.08.2025

Постановка проблеми

Тривалість експлуатації котельних установок значною мірою залежить від фізико-хімічних характеристик води. Незадовільна якість води, а також недостатній контроль і відсутність хімічної корекції в теплових мережах, паро- та конденсатопроводах, а також у котлах можуть спричинити утворення накипу, а також кисневу й вуглекислотну корозію. Це негативно впливає на ефективність роботи обладнання, знижує тепловіддачу, призводить до засмічення компонентів, скорочує термін служби техніки, зменшує рентабельність і продуктивність, а також збільшує періоди простою. Вода з підвищеним рівнем розчинених домішок, зокрема солей жорсткості, таких як кальцієві та магнієві сполуки, є особливо небезпечною для котельного обладнання. Однією з ключових рис цих солей є

їхня здатність осідати на внутрішніх поверхнях системи й формувати шар накипу. Як наслідок, утворення накипу істотно знижує теплопровідність металу, що змушує підвищувати рівень енергоспоживання для забезпечення необхідної продуктивності котельні. Водночас єдиним дієвим способом запобігти утворенню накипу залишається попереднє видалення розчинених домішок із води.

До основних джерел водопостачання котелень належать міські водопроводи, штучно створені

свердловини та водосховища. Водопровідна вода найчастіше спрямовується в систему водопідготовки та без додаткової обробки подається до теплових мереж і котлів. Якщо вода хлорована, необхідно здійснити її повну дехлорацію із застосуванням технологій зворотного осмосу чи хімічного знесолення, адже хлор руйнує аніони й мембрани, задіяні у зворотно-осмотичних системах. Що стосується води зі свердловин, вона зазвичай містить високий рівень іонів заліза, які також можуть накопичуватися у водопровідній системі внаслідок корозії труб. Таким чином, оптимізація характеристик водопостачання для котелень є актуальним завданням. Створення ефективнішої системи підготовки води в тепломережах за рахунок зміни її складу та властивостей відкриває перспективні напрями подальших досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Численні публікації, як вітчизняних [1–12] так і закордонних дослідників [13–21], стверджують, що магнітне поле може змінювати фізико-хімічні властивості води та здійснювати очистку від сполук металів та солей. Також впливає на оптичні властивості води, провідність і зменшує силу поверхневого натягу води, прискорює деградацію органічних речовин целюлозно-паперових стічних вод, гальмує осадження накипу на металевих поверхнях, змінює pH середовища. Застосування магнітного поля широко використовується для хімічної та харчової промисловості, теплопостачання, сільського господарства, та будівництва внаслідок зміни фізико-хімічних властивостей води.

Експериментальні результати щодо впливу магнітних полів на кінетику хімічних реакцій показують, що вплив магнітних полів не є однозначним для різних типів реакцій. Наприклад, швидкості гідролізу сахарози, оцтового ангідриду та сечовини зменшуються під впливом магнітних полів [22], тоді як швидкості багатьох окислювально-відновних реакцій значно зростають під впливом магнітних полів [23–28]. Однак, залежно від механізму конкретної реакції, магнітні поля можуть сповільнювати окисно-відновний процес або не впливати на його перебіг [25]. Причому ці ефекти спостерігаються, як при додаванні реагентів у попередньо намагнічену воду, так і при впливу на розчин магнітного поля. Як наслідок, існує значна кількість гіпотез, що пояснюють загальний вплив магнітних полів на системи водних розчинів: згідно з [27], магнітні поля збільшують рухливість молекул води. Одночасно зі збільшенням рухливості молекул константа дисоціації води зменшується і вона стає «структурованою», як показано в роботі [27]. Це свідчить про зменшення енергії водневих зв'язків між молекулами H_2O , що дозволяє такій воді легше розщеплюватися в організмі людини при споживанні. Таким чином, намагнічену воду слід розглядати як розчинник, що має схожі властивості зі звичайною водою, але певною мірою відрізняється від неї.

Відомо, що ефект магнітної обробки водних систем, як правило, є мультиполярним і залежить від параметрів магнітного поля та режиму обробки. Зміна фізико-хімічних властивостей водного середовища за допомогою магнітної обробки залежать від їх властивостей. Тому на теперішній час при дослідженнях впливу магнітного поля на воду можна проводити якісну оцінку результатів впливу. Існує ряд гіпотез, що застосовуються для пояснення впливу магнітного поля на водне середовище, які часто суперечать одна одній, навіть стосовно таких специфічних процесів, як утворення накипу та кристалізації-розчинення. Незважаючи на широке розмаїття водних систем, в яких були виявлені певні ефекти магнітного поля, спільним базовим компонентом є сама вода. Дослідження впливу магнітних полів на деіонізовану воду підтвердили [28] висновок про те, що магнітні поля спричиняють зміни в електронній структурі молекул води, які впливають на її фізико-хімічні властивості. Усі зміни водних розчинів після впливу магнітного поля можна пояснити зниженням іонного добутку води та зменшенням енергії водневих зв'язків між її молекулами, що виконують роль розчинника. Важливо зазначити, що ефекти магнітного поля проявляються не лише після нагрівання намагніченої води або розчинів до температури кипіння, але й після змін когезійного стану. Це було підтверджено завдяки інфрачервоній спектроскопії водяної пари, яка зафіксувала суттєве перетворення електронної структури молекул води після такого впливу. Виявлено також, що неоднорідне магнітне поле впливає безпосередньо на воду навіть у чистому вигляді, без будь-яких домішок, включаючи парамагнітні іони заліза. Автори роботи [30] дійшли схожого висновку, досліджуючи електропровідність глибоко-знесоленої води як у звичайних умовах, так і після її магнітної обробки. Додаткове підтвердження цього надають результати роботи [31], які демонструють, що вплив змінного магнітного поля спричиняє суттєві зміни фізичних властивостей води та льоду.

У ряді досліджень з електромагнітної обробки води наведено розрахунки для пристроїв, що намагнічують [32, 33]. Як свідчать проведені дослідження, ефекти магнітної обробки води та водних розчинів у цілому не показують очевидної й однозначної залежності від середньої індукції магнітного поля, його градієнтів або значення електрорушійної сили.

У той же час, розрахунки апріорі припускають такі чіткі залежності, на основі яких виконуються детальні розрахунки обладнання (гідродинамічні – для заданої продуктивності) та електричні розрахунки властивостей магнітопроводу. В цілому розрахунки електромагнітних пристроїв не відрізняються один від одного. Але перед введенням в експлуатацію пристроїв необхідно проводити налаштування.

У дослідженні [34] наведено оптимальні умови для проведення магнітної обробки, які були визначені експериментально. Згідно з експериментальними даними, оптимальне значення індукції

магнітного поля зростає зі збільшенням вмісту солей і загальної жорсткості для кожного класу води. Температура кипіння – ще один основний фізичний параметр води і його значення може змінюватися під дією магнітного поля [35]. Зміна температури кипіння може бути пов'язана з магнітним ефектом намагнічування води, а оптимальний ефект намагнічування було отримано при 300 мТл у нормальних умовах. Автори [36] вивчали вплив постійного магнітного поля на осадження карбонату кальцію та досліджували в різних умовах концентрації карбонату кальцію у воді, рН обробки та швидкості потоку води в магнітному полі. Оброблена вода була піддана тесту на утворення накипу шляхом дегазації розчиненого у воді CO_2 . Було виявлено, що магнітна обробка збільшує загальну кількість осаду та сприяє однорідному утворенню зародків залежно від рН оброблення води та часу, швидкості потоку води.

Розглянемо основні напрями побудови конструкції електромагнітних та магнітних апаратів впливу магнітного поля на воду та водні системи. Авторами [37] розроблено електромагнітний апарат (рис.1).

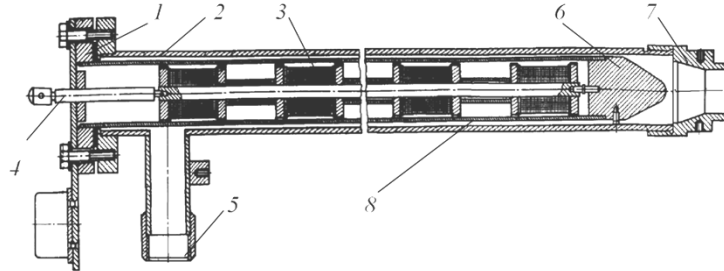


Рис. 1. Електромагнітний апарат (тип 15): 1 – фланець; 2 – корпус; 3 – електромагніт; 4 – шток; 5 – вхідний патрубок; 6 – регулятор швидкості потоку рідини; 7 – вихідний патрубок; 8 – труба

Електромагнітний апарат (рис. 1) призначений для магнітної обробки води з метою зниження карбонатних відкладень на поверхнях котлів опалення, що віддають тепло, і швидкісних водонагрівачів систем опалення та гарячого водопостачання житлових, громадських і промислових будинків. Технічні характеристики: продуктивність – $1,5 \text{ м}^3/\text{год}$, споживана потужність – не більше 100 Вт, максимальна температура води, що оброблюється – не більше 80°C . Використання апарату дозволяє знизити витрати енергоресурсів на 20%.

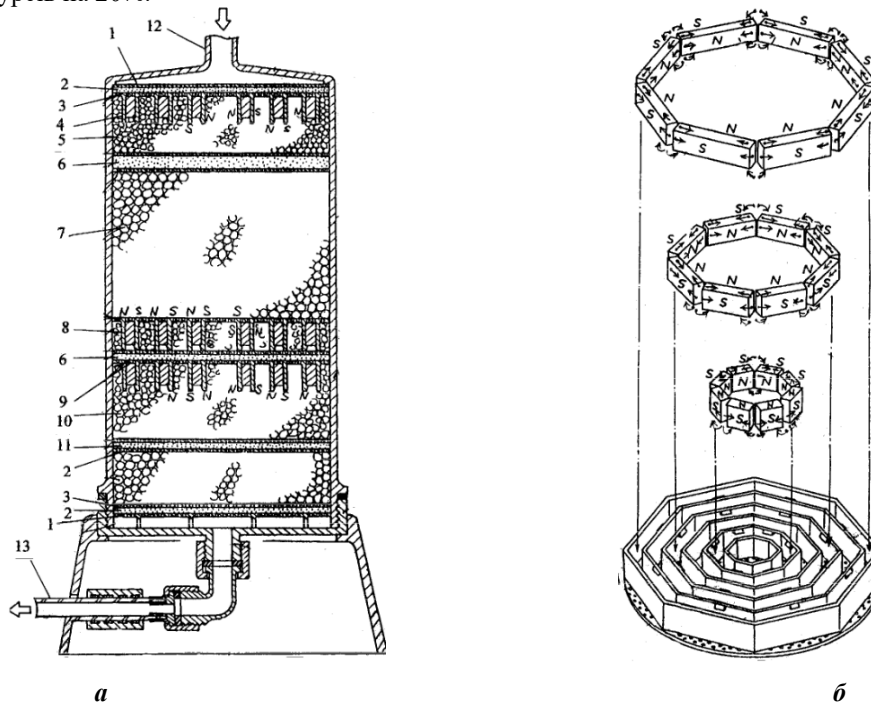


Рис. 2. Фільтр для доочищення питної води: а – розріз апарату; б – схема розташування магнітів: 1 – кришка; 2 – пластина з пластмаси; 3 – тканинний фіброзний фільтр; 4 – дошка магнітів (24 магніти, щілини заповнені керамічними гранулами); 5 – штучна пориста кераміка; 6 – фетрове вугілля; 7 – гранульоване активоване вугілля; 8 – дошка магнітів (щілини заповнені гранульованим активованим вугіллям); 9 – дошка магнітів (щілини заповнені керамічними гранулами); 10 – екоенергетична кераміка, збагачена залізом; 11 – активоване вугілля; 12 – вхідний патрубок; 13 – вихідний патрубок

Авторами [38] розроблено фільтр для доочищення питної води в якому застосовується магнітне поле створене постійними магнітами. Фільтр призначений для отримання високоякісної води в системах питного водопостачання. Апарат забезпечує п'ятирівневе доочищення питної води: фільтрація, очищення, знезараження, збагачення мікроелементами, біологічна активація магнітним полем. Обробка води сприяє тому, що вода набуває природні якості води. Апарат дозволяє отримувати високоякісну питну воду, в тому числі досягається зменшення вмісту канцерогенів (важких металів та

інших домішок). При цьому досягається зниження витрат у порівнянні з іншими способами не менше ніж на 75%.

Відомі пристрої сконструйовані з електромагнітами. Основним їхнім елементом є електромагнітні котушки, що встановлені на трубу по якій подається вода. Котушки налаштовані таким чином, щоб створювати змінне магнітне поле, інтервал якого відповідає довжині котушок. Також у трубу встановлено внутрішній феромагнітний сердечник і разом із зовнішнім магнітопроводом забезпечують появу зазору, через який здійснюється вплив магнітного поля на воду. Магнітне поле в цих пристроях характеризується крайнім ступенем неоднорідності у дискретних областях, що виражається великим градієнтом напруженості в напрямку, перпендикулярному до руху водної системи.

Автори [39], для створення неоднорідного магнітного поля пропонують використовувати феромагнітні пластини з отворами, розташовані перпендикулярно до магнітних силових ліній, що спричиняють викривлення останніх і створюють перпендикулярну до основної лінії складову індукції магнітного поля. Ця складова здатна змінюватися в межах, які залежать від товщини феромагнітних пластин, відстані їх розміщення та величини струму в котушці. Таким чином, перпендикулярна до осьової лінії складова індукції магнітного поля змінюється, як уздовж осьової лінії, так і в напрямку, перпендикулярному до неї.

На рис. 3(а), показано конфігурацію феромагнітних кілець, а на рис. 3(б) зміна перпендикулярної складової індукції $\vec{B}$.

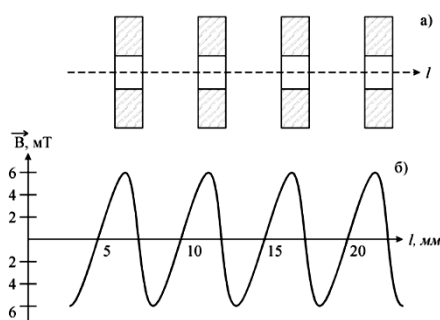


Рис. 3. Зміна магнітного поля у пристрої: а) конфігурація феромагнітних пластин; б) зміна перпендикулярної складової індукції магнітного поля вздовж вісі I

Під час створення апаратів для електромагнітної обробки води дослідники намагаються максимально ефективно використовувати магнітне поле, забезпечуючи його найбільший вплив на неї. Для досягнення цього вибирають оптимальні геометричні параметри простору, через який проходить вода, а також налаштовують конфігурації полюсних наконечників, магнітопроводів та інших елементів системи. Все це викликає асиметрію коливань, зміну енергії водневих зв'язків, що призводить до їх часткового розриву. Унаслідок цього змінюється взаємне розташування молекул, а отже, і структура води. Зі збільшенням величини зовнішнього магнітного поля посилюється поляризація електронних хмар, що супроводжується більш активним розривом водневих зв'язків. Кількість молекул, які виходять з положення рівноваги у вузлах квазикристалічної решітки й переміщуються в пустоти, також зростає. Магнітне поле у першу чергу діє на слабкі «довгі» зв'язки, викликаючи їх руйнування.

Авторами [40] запропоновано конструкцію пристрою для магнітної обробки води в якому поміж полюсами постійних магнітів було розміщено вставки з конусоподібних магнітопроводів, між якими проходить немагнітна трубка (рис. 4.8 а). Завдяки такій конструкції пристрою індукція магнітного поля на вершині конусної вставки становить 600 мТ при постійному полі 300 мТ.

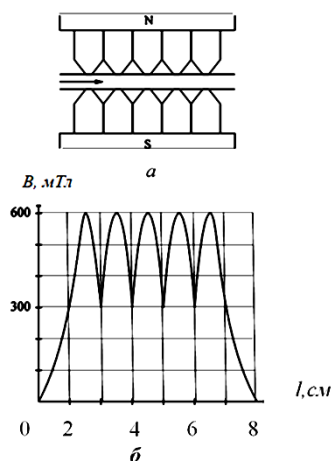


Рис. 4. Схема конструкції пристрою з конусоподібними вставками: а – конструкція вставок; б – параметри індукції по довжині немагнітної трубки

Автори [39, 40] досліджували вплив магнітного поля на воду застосувавши конструкції пристроїв із зворотнім рухом рідини крізь постійне магнітне поле (рис. 5).

У пристрої (рис. 5) між двома парами постійних магнітів встановлено трубку з чотирикратним згином вздовж постійних магнітів.

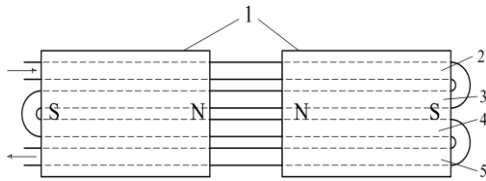


Рис. 5. Схема пристрою з чотирикратним згином трубки вздовж постійних магнітів: 1 - постійні магніти; 2, 3, 4, 5 – немагнітні трубки

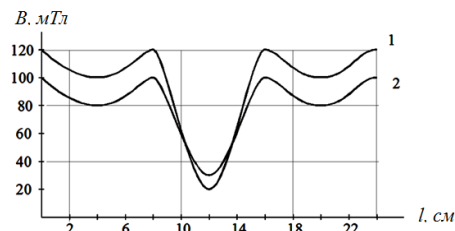


Рис. 6. Зміна величини індукції магнітного поля вздовж проходження розчину: 1 – трубки 2, 5; 2 – трубки 3, 4 з рис. 5

Авторами [41] для визначення ефекту кратності впливу магнітного поля на дистильовану воду розроблено конструкцію пристрою з 12-ти кратним перетином потоком води магнітних зон різної напруженості.

Магнітний пристрій (рис. 7) складається з трьох пар плоских магнітів, між якими крізь немагнітні трубки протікає вода.

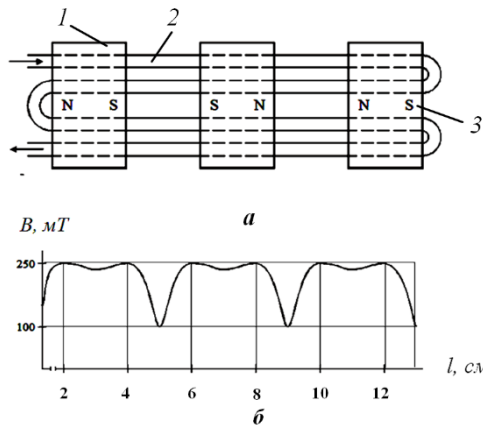


Рис. 7. Схема магнітного пристрою (а) та зміна індукції магнітного поля вздовж проходження води (б)

Магнітному полю піддавалася дистильована вода, майже без сторонніх домішок. Для визначення ступеня впливу магнітного поля на дистильовану воду застосовано експрес-метод контролю магнітної водної підготовки, заснований на реакції окиснення тіосульфату натрію йодом [41]. У дистильованій воді, після проходження процесу намагнічування, швидкість зазначеної хімічної реакції збільшується на 80% у порівнянні з аналогічною водою без попереднього впливу магнітного поля. Кратність проходження води крізь магнітне поле змінної індукції також впливає на зміну властивостей води, але її збільшувати вище 12 не доцільно.

З аналізу джерел встановлено, що магнітне поле, яке може створюватися електромагнітами або постійними магнітами, значно впливає на зміну властивостей та склад води, а обладнання та пристрої повинні мати змінну індукцію магнітного поля вздовж проходження води, що досягається певними відстанями між магнітами.

Актуальність дослідження

Дослідження працездатності запропонованої конструкції обладнання для підготовки води для тепломереж, з багатоциклічним впливом магнітного поля на воду за часом з визначенням зміни її структури та властивостей, є актуальною науково-технічною задачею.

Виклад основного матеріалу

Для проведення експериментальних досліджень впливу постійного магнітного поля на властивості води було спроектовано та виготовлену установку (рис. 8), яка дає можливість впливу неоднорідного магнітного поля на потік води, що проходить крізь блок постійних магнітів, розташованих у корпусі з певним кроком (рис. 9).

Працює установка наступним чином. При включенні електродвигуна з насосом 2 вода з бака 1 подається крізь вхідний трубопровід 7 в насос 2. Далі вода поступає у блок регулювання кранами 5 де є можливість перенаправляти потоки води крізь блок постійних магнітів 3 та частково відводити крізь переливний трубопровід 6 у бак 1, таким чином можна регулювати швидкість проходження води крізь магнітне поле змінюючи вхідний тиск води, який фіксувався манометром 4. Таким чином на відміну від проаналізованого обладнання вплив магнітного поля здійснюється циклічно за часом, що призводить до більш значного впливу на показники води.

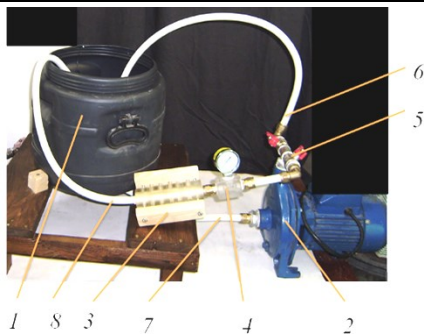


Рис. 8. Фотографія експериментальної установки циклічного магнітного впливу на воду: 1 – бак; 2 – насос з електродвигуном; 3 – блок постійних магнітів; 4 – манометр тиску; 5 – крани; 6 – переливний трубопровід; 7 – вхідний трубопровід; 8 – зливний трубопровід

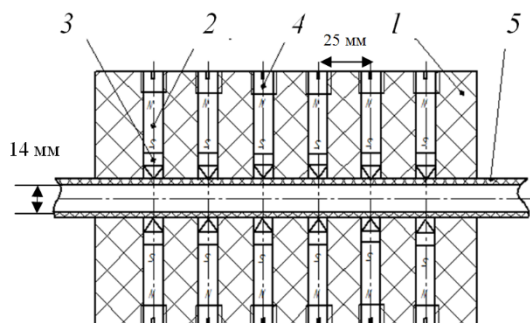


Рис. 9. Схема конструкції встановлення постійних магнітів: 1 – немагнітний корпус; 2 – постійний магніт; 3 – конусна вставка; 4 – заглушка; 5 – немагнітна трубка зливного трубопроводу

В дослідженнях ставилося завдання визначення зміни показника Рн водопровідної води за часом при різних швидкостях проходження води крізь блок постійних магнітів та оцінити зміну структурного стану води кристало-оптичним методом [42] з наступним аналізом термостатичного вимірювання температури кипіння води обробленої магнітним полем.

Для експерименту було залито в бак 10 літрів водопровідної води. Попередньо було виміряне рН-метром (рис. 10) показник рН, який становив рН 7,3. Після циклічного оброблення води магнітним полем постійних магнітів зі змінною індукцією в експериментальній установці за часом впливу магнітного поля було побудовано графік зміни показника рН при різних швидкостях руху води крізь магнітний блок (рис. 11).

Встановлено, що показник рН води за часом зростає до величини рН 8,0, що говорить про зміну її стану з утворенням розриву водневих зв'язків. Найбільший вплив на показник рН отримано при швидкості потоку $V = 1,4$ м/с.



Рис. 10. Фотографія загального вигляду електронного рН-метра

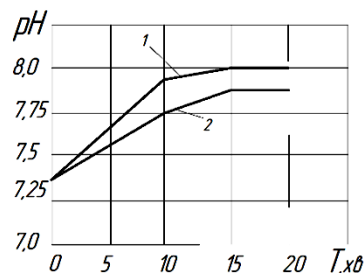


Рис. 11. Графік зміни показника рН води після магнітної обробки за часом: 1 – швидкість потоку $V = 1,4$ м/с; 2 – швидкість потоку $V = 0,8$ м/с

Наступним етапом аналізу впливу магнітного поля на структуру води було проведено кристало-оптичний аналіз [42] вигляду осаду висушеної краплі води із застосуванням мікроскопу МР-10 з виводом зображення на персональний комп'ютер електронного зображення та отримання фотографій – скріншотів для подальшого аналізу.

Спочатку було утворену краплю води на прозорому склі без оброблення магнітним полем, а потім утворено краплю води на прозорому склі після оброблення 15 хвилин. Вони були висушені в натуральних умовах при температурі 20°C. Структура осаду висушених крапель була досліджена за допомогою мікроскопу та сфотографована і зафіксована електронним файлом на персональному комп'ютері (рис. 12).

На фотографії осаду краплі води рис. 12, а спостерігається нерівномірне розташування осаду солей карбонатів CaCO_3 , MgCO_3 , оксикарбонатів $\text{Mg}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ і гідроокисів $\text{Fe}(\text{OH})_2$ по поверхні. Це пояснюється тим, що необроблена водопровідна має кластерний невідновлений енергетичний стан, значну силу поверхневого натягу, що при висиханні стягує солі у крайову зону краплі при її осушенні.

На фотографіях осаду крапель води, оброблених магнітним полем, рис. 12, б та на фотографії рис.12, с у збільшеному масштабі, спостерігається рівномірне вільне розтікання рідини з утворенням більш рівномірно утвореного осаду, що говорить про зменшення сили поверхневого натягу та рівномірний розподіл кристалів осаду карбонатів CaCO_3 , MgCO_3 , оксикарбонатів $\text{Mg}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$ і гідроокисів $\text{Fe}(\text{OH})_2$ по поверхні. Це пояснюється структуризацією води – подрібненням її кластерної структури, відсутністю росту дендритних структур.

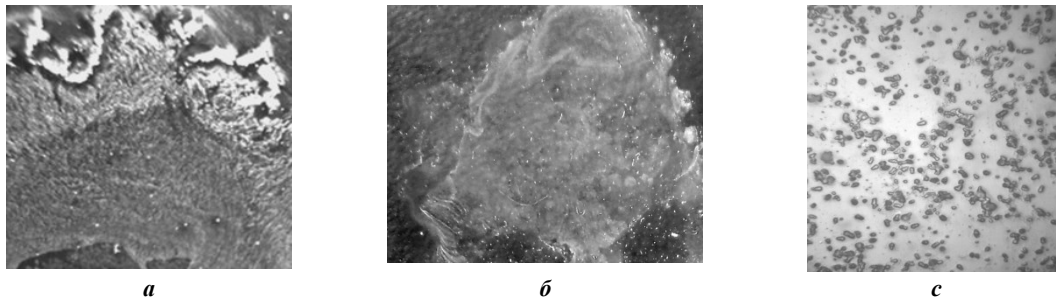


Рис. 12. Фотографії результатів кристало-оптичного аналізу висухої краплі водопровідної води:
 а – необробленою магнітним полем (збільшення у 20 разів); б – після 15 хвилин оброблення (збільшення у 10 разів);
 с – після 15 хвилин оброблення (збільшення у 1 см = 15 мкм)

Також було проведено дослідження термостатичні вимірювання процесу кипіння дистильованої води об'ємом 100 мл за нормальних умов, обробленої магнітним полем. У результаті термостатичного вимірювання процесу нагрівання встановлено, що намагнічена дистильована вода, в порівнянні із нагріванням звичайної водопровідної води, (рис. 13, крива 1) має відхилення від прямої лінії, що починаються близько 80°C (рис. 13, крива 2). Результати проведених досліджень вказують про порушення нерівноцінності водневих зв'язків між молекулами води після магнітної обробки.

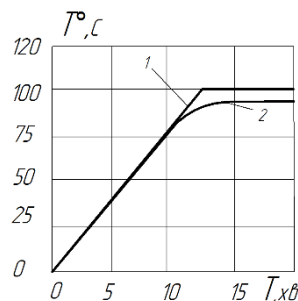


Рис. 13. Графіки процесу нагрівання дистильованої води: 1 – без магнітної обробки; 2 – після магнітної обробки

Висновки

Запропонована конструкція обладнання підготовки води з циклічним впливом магнітного поля за часом, змінної індукції вздовж осі проходження води, створює ефекти розриву водневих зв'язків у молекулах води та призводить до зниження температури кипіння води, відхилення починаються вище 80°C.

У результаті проведених досліджень кристало-оптичного аналізу структури висушеної краплі води після оброблення магнітним полем підтверджено, що отримується більш структурований стан водного середовища та зменшується сила поверхневого натягу води, підвищується показник Рн з 7,3 до 8,0 од.

Оптимізація характеристик води для котелень циклічним впливом магнітного поля за часом, а саме підвищення показника Рн, зміни структурного стану води, дозволить зменшити навантаження на обладнання пом'якшення іонним обміном та збільшити строк роботи обладнання демінералізації води методом зворотного осмосу.

Література

1. Інноваційні нанотехнології активації і знезаражування води та вібраційне обладнання [Р. І. Сілін, А. І. Гордєєв, Г. Б. Параска, В. Д. Пархоменко, В. В. Кравчук] Хмельницький. ХмЦНП, 2013. 252 с., іл.
2. Калінський, Є. О., Бордюк О. Ю., Єрмаков С. О. Вплив електромагнітного випромінювання на біологічні властивості води. *Харчова промисловість*. 2004. Вип. 3. С. 98–99.
3. Вплив механічної і магнітної обробки на фізико-хімічні показники води [В. В. Остапенко, В. Л. Прибильський, І. О. Костюк, О. М. Костюк] *Харчова промисловість*. 2007. Вип. 5. С. 45–47.
4. Дослідження впливу сили електромагнітного поля на якість очистки води від важких металів методом феритизації. [Ємчура Б. М., Пахомов Д. В., Кочетов Г. М., Самченко Д. В.] *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. К.: КНУБА, 2021, вип. 35. С. 4–10.
5. Пахомов Д. В., Кочетов Г. М., Самченко Д. В. Феритизаційна очистка стічних вод від сполук хрому (VI) з використанням електромагнітної імпульсної активації. *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*. К.: КНУБА, 2021, вип. 37. С. 65–74.
6. Гаращенко О. В., Гаращенко В. І. Ресурсозберігаюча технологія магнітного очищення водних середовищ [Електронний ресурс] *Наукові праці Одеської національної академії харчових*

технологій. 2015. Вип. 47 (2). С. 105–108.

7. Holysz L, Szczes A, Chibowski E. Effects of a static magnetic field on water and electrolyte solutions. *J Colloid Interface Sci.* 2007;316(2):996. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2007.08.026>.

8. Amiri MC, Dadkhah AA. On reduction in the surface tension of water due to magnetic treatment. *Colloids Surf A.* 2006;278(1):252–5. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.12.046>.

9. Cai R, Yang H, He J, et al. The effects of magnetic fields on water molecular hydrogen bonds. *J Mol Struct.* 2009;938(1–3). pp. 15–9. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2009.08.037>.

10. Toledo EJJ, Ramalho TC, Magriotis ZM. Influence of magnetic field on physical–chemical properties of the liquid water: insights from experimental and theoretical models. *J Mol Struct.* 2008;888(1–3). pp. 409–15. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2008.01.010>.

11. Chang K. T, Weng CI. The effect of an external magnetic field on the structure of liquid water using molecular dynamics simulation. *J Appl Phys.* 2006;100:043917. <https://doi.org/10.1063/1.2335971>.

12. Liu B, Gao B, Xu X, et al. The combined use of magnetic field and iron-based complex in advanced treatment of pulp and paper wastewater. *Chem Eng J.* 2011;178(1). pp. 232–8. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.10.058>.

13. Kobe S, Drazic G, McGuinness PJ, et al. The influence of the magnetic field on the crystallisation form of calcium carbonate and the testing of a magnetic water-treatment device. *J Magn Magn Mater.* 2001;236(1–2).pp.71–6. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(01\)00432-2](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(01)00432-2).

14. Maffei M. E. Magnetic field effects on plant growth, development, and evolution. *Front Plant Sci.* 2014;5(1) pp.1–15. , <http://orcid.org/0000-0001-6814-2353>.

15. Wei H, Wang Y, Luo J. Influence of magnetic water on early-age shrinkage cracking of concrete. *Constr Build Mater.* 2017;147(1). pp. 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.140>.

16. Баран Б. А. Інструментальні методи дослідження ред-окс-реакцій в умовах магнітного поля. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.* 1997. №2. С. 181–183.

17. Баран Б. А., Дроздовський В. Б., Квашенко А. П. Кондуктометричне та потенціометричне вимірювання швидкості фізико-хімічних процесів в магнітному полі. *Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.* 1998. №1. С. 68–70.

18. Youkai Wang, Huinan Wei, Zhuangwen Li. Effect of magnetic field on the physical properties of water. *Results in Physics.* Volume 8, March 2018, pp. 262–267.

19. Fathi Alimi, Mohamed Tlili, Mohamed Ben Amor, Claude Gabrielli, George Maurin, Add to Mendeley. Influence of magnetic field on calcium carbonate precipitation. *Desalination.* Volume 206, Issues 1–3, 5 February 2007, pp. 163–168.

20. Пат. 37414 А Україна МПК СО2F1/48. Пристрій для обробки водних розчинів магнітним полем / Баран Б. А., Дроздовський В. Б. №980951558; Опубл. 15.05.2001. Бюл. №4.

21. Баран Б. А., Дроздовський В. Б. Вплив конфігурації магнітного поля на іонний обмін. Частина III. *Вісник технологічного університету Поділля.* 1999. № 6. С. 174–177.

22. Пат. 32362 Україна, МПК СО2F1/48. Експрес-метод контролю магнітної водопідготовки / Баран Б. А. №99042305; Заявл. 23.04.1999; Опубл. 15.12.2000, Бюл. № 7–11.

23. Пат. на корисну модель №128630 України. МПК G01N 21/3577. Спосіб кристало-оптичного аналізу структурної будови води та ступеню її активації і забруднення біологічними рештками / А. Л. Ганзюк, В. П. Олександренко, А. І. Гордєєв, Н. О. Костюк; № u201804393; Заявл. 20.04.2018; Опубл. 25.09.2018, Бюл. №18.

References

1. Innovatsiini nanotekhnolohii aktyvatsii i znezarazhuvannia vody ta vibratsiine obladnannia [R. I. Silin, A. I. Hordieiev, H. B. Paraska, V. D. Parkhomenko, V. V. Kravchuk] Khmelnytskyi. KhmTsNII, 2013. 252 s., il.

2. Kalinskyi, Ye. O., Bordiuk O. Yu., Yermakov S. O. Vplyv elektromahnitnoho vyprominiuvannia na biolohichni vlastyvoli vody. *Kharchova promyslovist.* 2004. Vyp. 3. S. 98–99.

3. Vplyv mekhanichnoi i mahnitnoi obrobky na fizyko-khimichni pokaznyky vody [V. V. Ostapenko, V. L. Prybylskyi, I. O. Kostiuk, O. M. Kostiuk] *Kharchova promyslovist.* 2007. Vyp. 5. S. 45–47.

4. Doslidzhennia vplyvu syly elektromahnitnoho polia na yakist ochystky vody vid vazhkykh metaliv metodom ferytyzatsii. [Yemchura B. M., Pakhomov D. V., Kochetov H. M., Samchenko D. V.] *Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliky.* K.: KNUBA, 2021, vyp. 35. S. 4–10.

5. Pakhomov D. V., Kochetov H. M., Samchenko D. V. Ferytyzatsiina ochystka stichnykh vod vid spoluk khromu (VI) z vykorystanniam elektromahnitnoi impulsnoi aktyvatsii. *Problemy vodopostachannia, vodovidvedennia ta hidravliky.* K.: KNUBA, 2021, vyp.37. S. 65–74.

6. Harashchenko O. V., Harashchenko V. I. Resursozberihaiucha tekhnolohiia mahnitnoho ochyshchennia vodnykh seredovyshch [Elektronnyi resurs] *Naukovi pratsi Odeskoi natsionalnoi akademii kharchovykh tekhnolohii.* 2015. Vyp. 47 (2). S. 105–108.

7. Holysz L, Szczes A, Chibowski E. Effects of a static magnetic field on water and electrolyte solutions. *J Colloid Interface Sci.* 2007;316(2):996. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2007.08.026>.

8. Amiri MC, Dadkhah AA. On reduction in the surface tension of water due to magnetic treatment. *Colloids Surf A.* 2006;278(1):252–5. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.12.046>.

9. Cai R, Yang H, He J, et al. The effects of magnetic fields on water molecular hydrogen bonds. *J Mol Struct.* 2009;938(1–3). rr. 15–9. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2009.08.037>.

10. Toledo EJJ, Ramalho TC, Magriotis ZM. Influence of magnetic field on physical–chemical properties of the liquid water: insights from experimental and theoretical models. *J Mol Struct.* 2008;888(1–3). rr. 409–15. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2008.01.010>.

10.1016/j.molstruc.2008.01.010.

11. Chang K. T, Weng CI. The effect of an external magnetic field on the structure of liquid water using molecular dynamics simulation. *J Appl Phys.* 2006;100:043917. <https://doi.org/10.1063/1.2335971>.

12. Liu B, Gao B, Xu X, et al. The combined use of magnetic field and iron-based complex in advanced treatment of pulp and paper wastewater. *Chem Eng J.* 2011;178(1). rr. 232–8. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.10.058>.

13. Kobe S, Drazic G, McGuiness PJ, et al. The influence of the magnetic field on the crystallisation form of calcium carbonate and the testing of a magnetic water-treatment device. *J Magn Magn Mater.* 2001;236(1–2).rr.71–6. [https://doi.org/10.1016/S0304-8853\(01\)00432-2](https://doi.org/10.1016/S0304-8853(01)00432-2).

14. Maffei M. E. Magnetic field effects on plant growth, development, and evolution. *Front Plant Sci.* 2014;5(1) rr.1–15. , <http://orcid.org/0000-0001-6814-2353>.

15. Wei H, Wang Y, Luo J. Influence of magnetic water on early-age shrinkage cracking of concrete. *Constr Build Mater.* 2017;147(1). rr. 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.140>.

16. Baran B. A. Instrumentalni metody doslidzhennia red-oks-reaktsii v umovakh mahnitnoho polia. Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsessakh. 1997. №2. S. 181–183.

17. Baran B. A., Drozdovskyi V. B., Kvashenko A. P. Konduktometrychne ta potentsiometrychne vymiriuvannia shvydkosti fizyko-khimichnykh protsesiv v mahnitnomu poli. Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. 1998. №1. S. 68–70.

18. Youkai Wang, Huinan Wei, Zhuangwen Li. Effect of magnetic field on the physical properties of water. *Results in Physics.* Volume 8, March 2018, pp. 262-267.

19. Fathi Alimi, Mohamed Tlili, Mohamed Ben Amor, Claude Gabrielli, George Maurin, Add to Mendeley. Influence of magnetic field on calcium carbonate precipitation. *Desalination.* Volume 206, Issues 1-3, 5 February 2007, pp. 163-168.

20. Pat. 37414 A Ukraina MPK CO2F1/48. Prystrii dlia obrobky vodnykh rozchyniv mahnitnym polem / Baran B. A., Drozdovskyi V. B. №980951558; Opubl. 15.05.2001. Biul. №4.

21. Baran B. A., Drozdovskyi V. B. Vplyv konfiguracyi mahnitnoho polia na ionnyi obmin. Chastyna III. Visnyk tekhnolohichnoho universytetu Podillia. 1999. № 6. C. 174–177.

22. Pat. 32362 Ukraina, MPK CO2F1/48. Ekspres-metod kontroliu mahnitnoi vodopidhotovky / Baran B. A. №99042305; Zaiavl. 23.04.1999; Opubl. 15.12.2000, Biul. № 7-11.

23. Pat. na korysnu model №128630 Ukrainy. MPK G01N 21/3577. Sposib krystal-optychnoho analizu strukturnoi budovy vody ta stupeniu yii aktyvatsii i zabrudnennia biolohichnymi reshtkami / A. L. Hanzhiuk, V. P. Oleksandrenko, A. I. Hordieiev, N. O. Kostiuk; № u201804393; Zaiavl. 20.04.2018; Opubl. 25.09.2018, Biul. №18