

УДК 628.16:628.35

USE OF COAGULANTS AND AFM LOADING FOR PRE-TREATMENT OF WATER FROM SURFACE SOURCES FOR THE NEEDS OF THERMAL POWER PLANTS OF FOOD ENTERPRISES

I. Potapchuk, N. Husiatynska

National University of Food Technologies

Key words:

*Filtration
Coagulation
Water purification
Water supply of
enterprises*

Article history:

Received 08.01.2025
Received in revised form
29.01.2025
Accepted 14.02.2025

Corresponding author:

N. Husiatynska

E-mail:

ngusyatynska@ukr.net

Citation: Потапчук І. М., Гусятинська Н. А. (2025). Використання коагулянтів і завантаження AFM для попереднього очищення води з поверхневих джерел для потреб теплових установок харчових підприємств. *Наукові праці НУХТ*, 31(1), 185—196.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-1-15

ABSTRACT

The technology of pre-treatment of water from surface sources for thermal plants using coagulants and AFM loading is reviewed in the article. The problem is the deterioration of the quality of water used in thermal power plants due to the presence of mineral and organic impurities that lead to scale, corrosion and a decrease in the efficiency of the equipment. It is shown that the technological scheme for surface water purification should ensure high purification efficiency, the ability to regulate the main technological parameters, the structural simplicity of the equipment and a long service life.

An instrumental and technological scheme of a water purification plant has been developed, which includes: oxidation (disinfection) with sodium hypochlorite; filtration to remove impurities larger than 130 microns; coagulation clarification of water using contact coagulation on an AFM loading.

Industrial tests of the effectiveness of the developed technology have been carried out. The dependence of the pressure difference in the filtration process on the AFM loading on the duration of the process has been determined. It was found that the rational duration of the filter cycle process during contact coagulation on a multilayer AFM loading of fractional composition 2—4 mm, 0.7—2 mm and 0.4—0.8 mm is 140—150 min. For regeneration of the loading, backwashing with clean water for 10—20 min is recommended, which in general ensures complete cleaning of the loading under the condition of an operating pressure difference of 0.2—0.8 bar.

Among the advantages of the proposed technology, it should be noted high productivity with relatively compact dimensions of the equipment compared to the classical technology, stability of cleaning efficiency, automated operation mode. The obtained research results in industrial conditions confirm the possibility of using the developed technology at the stage of preliminary water preparation before feeding for further cleaning by ion-exchange softening.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-1-15

ВИКОРИСТАННЯ КОАГУЛЯНТІВ І ЗАВАНТАЖЕННЯ АФМ ДЛЯ ПОПЕРЕДНЬОГО ОЧИЩЕННЯ ВОДИ З ПОВЕРХНЕВИХ ДЖЕРЕЛ ДЛЯ ПОТРЕБ ТЕПЛОСИЛОВИХ УСТАНОВОК ХАРЧОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

І. М. Потапчук, Н. А. Гусятинська

Національний університет харчових технологій

У статті розглянуто технологію попереднього очищення води з поверхневих джерел для теплових установок з використанням коагулянтів і завантаження АФМ. Проблема полягає у погіршенні якості води, яка використовується в теплосилових установках, через наявність мінеральних та органічних домішок, що призводять до накипу, корозії та зниження ефективності обладнання. Показано, що технологічна схема для очищення поверхневих вод повинна забезпечити високу ефективність очищення, можливість регулювання основних технологічних параметрів, конструктивну простоту обладнання і тривалий термін його роботи.

Розроблено апаратурно-технологічну схему установки для очищення води, що включає: окиснення (дезінфекція) гіпохлоритом натрію; фільтрацію для видалення домішок розміром більше 130 мкм; коагуляційне освітлення води з використанням контактної коагуляції на завантажених типу АФМ.

Проведено промислові випробування ефективності розробленої технології. Визначено залежність різниці тиску в процесі фільтрування на завантаженні АФМ від тривалості процесу. Встановлено, що раціональна тривалість процесу фільтроциклу під час контактної коагуляції на багатощаровому завантаженні АФМ фракційного складу 2—4 мм, 0,7—2 мм та 0,4—0,8 мм складає 140—150 хв. Для регенерації завантаження рекомендується зворотне промивання чистою водою протягом 10—20 хв, що в цілому забезпечує повне очищення завантаження за умови робочої різниці тиску 0,2—0,8 бар.

Серед переваг запропонованої технології слід відзначити високу продуктивність при відносно компактних габаритах обладнання порівняно з класичною технологією, стабільність ефективності очищення, автоматизований режим роботи. Отримані результати досліджень у промислових умовах підтверджують можливість застосування розробленої технології на стадії попередньої підготовки води перед подачею на подальше очищення шляхом іонообмінного пом'якшення.

Ключові слова: фільтрація, коагуляція, очищення води, водопостачання підприємств.

Постановка проблеми. При переробці харчової сировини широко використовуються теплові процеси, що обумовлює технологічну потребу одержання та використання пари. Використання води як теплоносія обумовлюється її високою питомою теплоємністю, відносною дешевизною і доступністю. Особливістю роботи теплосилових установок є потреба у спеціально підготовленій воді, оскільки термін служби обладнання котельень багато в чому залежить від її фізичних і хімічних

властивостей (Душенко, & Ткачук, 2024). Так, наявність солей жорсткості, кисню, вуглекислоти у воді призводить до утворення накипу на поверхні теплообміну, кислотної корозії металу, що впливає на умови безпечної експлуатації обладнання, зменшення терміну його роботи, збільшення витрат палива внаслідок зниження коефіцієнта теплопередачі (Obodovych, Sydorenko, & Rezakova, 2023). Отримання водяної пари при високій температурі забезпечується в парових котлах високого тиску, тому розчинені солі, що містяться в поживній воді навіть у незначній кількості (наприклад, загальна жорсткість менше 3 мг/кг), можуть призвести до аварійного стану котельних агрегатів і виходу їх з ладу (Айрапетян, & Чуб, 2024). Важливу роль у боротьбі з утворенням відкладень і корозією металевих труб відіграє система очищення живильної та підживлювальної вод (Osipanova, Nussupbekov, & Oshapov, 2023).

Для водопостачання теплового господарства підприємств харчової галузі, зазвичай, використовують поверхневі і підземні природні води, зокрема з поверхневих прісних джерел — 81%, підземних — 13%, солоних — 6% (Долина, Машихіна, & Козачина, 2021). Проте слід зазначити, що якість поверхневих вод постійно погіршується, спостерігається прогресуючий дефіцит води, зокрема внаслідок змін клімату й антропогенної діяльності людини (Delpla, Jung, & Thomas, 2009), що вимагає подальших досліджень технологічних аспектів водопідготовки, в тому числі з використанням поверхневих вод, води з циркуляційних систем підприємств тощо. Зазначені води характеризуються різним хімічним складом домішок, що потрапляють унаслідок природного коловороту та в результаті техногенного забруднення стоками промислових та сільськогосподарських підприємств.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогодні науковці пропонують різні способи підвищення ефективності підготовки води з використанням коагуляції з мікрофільтрацією (Shaheen, & Cséfalvai, 2023); іонообміну (Gomelya, Hrabitchenko, & Shablii, 2016); дискретно-імпульсного введення енергії (Ободович, Целень, & Степанова, 2024); зворотного осмосу (Сербов, & Згадова, 2021) та ін. Оскільки для забезпечення роботи теплосилових установок потребується велика кількість прісної води як підживлювальної води для компенсації втрат кругообігу води в теплогенеруючих системах (Shaheen, & Cséfalvai, 2023), то питання підготовки води для теплового господарства харчових підприємств залишається актуальним і потребує подальших досліджень з метою усунення існуючих проблем якості вихідної води та відповідно розроблення раціонального способу її підготовки для подальшого використання.

Вимоги до води, що використовується для роботи котельного обладнання, регулюють прозорість, жорсткість, значення рН, вміст заліза, міді, розчиненого у воді кисню, нафтопродуктів, та знаходяться в межах, визначених у «Правилах будови і безпечної експлуатації теплових і водогрійних котлів».

Природна вода є складною дисперсною системою, дисперсна фази якої містять гази, мінеральні і органічні речовини, мікроорганізми. Наявність хімічних речовин у воді з поверхневих і підземних джерел визначається як умовами природного походження, так і є наслідком техногенного забруднення стічними водами промислових підприємств, шахтними водами, сільськогосподарськими та побутовими стоками.

До розчинних мінеральних сполук, що містяться у природній воді, належать

хлориди, сульфати і нітрати лужних і лужноземельних металів, які знаходяться у вигляді дисоційованих іонів: катіонів водню (H^+), металів (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}), аніонів кислотних залишків (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-}), гідроксиду (OH^-). Прості органічні сполуки у водному середовищі перебувають у вигляді молекулярних розчинів. Складні органічні речовини (білки, полісахариди, жири) у водному розчині знаходяться у нанодиспергованому стані у вигляді колоїдів. У воді містяться деякі газоподібні речовини: кисень (O_2), діоксид вуглецю (CO_2), сірководень (H_2S), водень (H_2), азот (N_2), метан (CH_4) тощо. Окрім макроелементів (натрію, калію, кальцію, магнію, азоту, сірки, фосфору, хлору тощо), у воді виявлено біля 65 мікроелементів (залізо, мідь, цинк, марганець, кобальт, селен, молібден, фтор, йод тощо) (Бабієнко, & Мокієнко, 2021).

У складі природних вод з різних джерел містяться різні за складом домішки мінерального або органічного походження, тому без попереднього очищення та підготовки природні води є непридатними для живлення котлів. Досягнення визначених показників якості живильної води забезпечується складним і багатоетапним технологічним процесом, що включає стадії попереднього очищення від зважених домішок та колоїдних речовин, знезалізнення, деаерацію, іонообмін та ін. (Долінський, Ободович, & Лимар, 2021).

Домішки, що містяться у воді, можна розділити на дві групи: розчинені і нерозчинені (механічні). Висока каламутність, наявність зважених і колоїдних частинок призводить до накопичення шламу, забивання трубої системи котла і порушення циркуляції теплоносія. Залежно від джерела водозабору і кількісних показників нерозчинених забруднень обирається метод механічного очищення і освітлення води. У найпростішому випадку застосовують механічний фільтр з рейтингом фільтрації 200—500 мкм, а при поверхневому водозаборі — додаткову обробку коагулянтами і флокулянтами з подальшим відстоюванням і освітленням (Obodovych, Sydorenko, & Rezakova, 2023).

Ефективність очищення води з поверхневих джерел (річок, озер, ставків) значною мірою залежить від вибору коагулянту і встановлення раціональних умов його використання (Гусятинська, Деменюк, & Шульга, 2022). Наявність колоїдів може інтенсифікувати процес утворення накипу та навіть призводити до фізичного блокування трубопроводів (Shaheen, & Cséfalvay, 2023). При цьому важливим є забезпечення високої ефективності дії коагулянту за умови мінімізації його дозування. На сьогодні науковцями та практиками приділяється багато уваги проблемам очищення води, проте питання вибору ефективного й економічно вигідного коагулянту залишається не до кінця вирішеним. Складність питання зумовлюється необхідністю раціонального підбору коагулянту з урахуванням хімічного складу води, показника рН, температури, що, зазвичай, впливає як безпосередньо на процес коагуляції високомолекулярних сполук та колоїдів, так і на подальшу поведінку коагулянтів, що, у свою чергу, зумовлює необхідність ретельної оцінки різних коагулянтів, враховуючи їх повний склад і гідрохімічні властивості для забезпечення умов найбільш повного видалення речовин колоїдної дисперсності та досягнення мінімального залишкового вмісту коагулянту у воді (Pivokonsky та ін., 2024).

Для знекиснення живильної води водогрійних котлів і підживлювальної води теплових мереж використовується деаерація води, яка може бути хімічною і термічною з вакуумними деаераторами (Поржезінський, 2020). Як варіант хімічної деаерації води є технологія, що заснована на дії монорозчином сульфїту натрію в стехіометричній кількості концентрацією 10—15% з подальшою фільтрацією через Redox-K фільтр. Фільтр використовується як каталізатор прискорення реакції окислення сульфїту натрію (Поржезінський, 2019). Однак ця стадія підготовки є кінцевою та вимагає навіть при заміні пом'якшення на стабілізаційну обробку комплексом реагентів, дотримання відсутності механічних домішок, оскільки їх наявність призводить до забруднення фільтрувального матеріалу фільтру Redox-K та відповідно зниження його експлуатаційних параметрів.

Для зниження жорсткості до відповідних норм, залежно від якості вихідної води, застосовують реагентний, термічний, мембранний, іонообмінний методи пом'якшення, а також різні їх комбінації (Kovalenko, Lys, & Lashkovska, 2019). Зазначені методи повинні забезпечувати можливість досягнення необхідних значень по загальній жорсткості в межах 0,1—0,01 мг-екв/дм³ (НПАОП 0.00-1.08-94.), залежно від особливостей вимог котлового обладнання.

Однак більшість запропонованих методів є достатньо чутливими до якості вихідної води, зокрема вмісту колоїдних забруднень, що вимагає попередньої її підготовки перед процесом пом'якшення. В Інституті технічної теплофізики НАН України проведені дослідження щодо використання методу дискретно-імпульсного введення енергії для очищення води (Ободович, Переяславцева, & Чернявський, 2024). В промислових умовах було встановлено, що при застосуванні методу дискретно-імпульсного введення енергії в процесі аераційної обробки води відбувається інтенсифікація процесу її очищення від іонів заліза та мангану (Долінський, Ободович, & Гусятинська, 2018). Також зазначається, що в разі додавання до вихідної води гідроксиду амонію у кількості 0,008—0,015% з наступною обробкою за використання методу дискретно-імпульсного введення енергії в роторно-пульсаційному апараті забезпечується суттєве зниження жорсткості живильної води, що сприятиме підвищенню надійності та подовження ресурсу котлів ДКВР (Ободович, Переяславцева, & Чернявський, 2024).

Доцільність застосування іонного обміну визначається складом мінералізованих вод і оптимальними умовами проведення процесів сорбції іонів, десорбції і переробки сорбатів. Натрій-катіонітовий метод пом'якшення води застосовують для пом'якшення підземних поверхневих вод із вмістом завислих речовин не більше 5—8 мг/дм³ і кольоровістю не більше 30 град. (Макаренко, Крисенко, & Глушко, 2024), що, у свою чергу, особливо актуально при використанні поверхневих джерел, по типу річок та озер, та вимагає попередньої підготовки води.

Отже, підготовка води для теплосилового господарства харчових підприємств складається з ряду технологічних стадій, метою яких є видалення органічних та мінеральних сполук. Важливою стадією попереднього очищення води перед пом'якшенням є її освітлення та видалення колоїдних домішок, що можливо шляхом застосування хімічних реагентів, зокрема коагулянтів і фільтрування.

Мета дослідження: проведення аналізу та вибір технології попереднього очищення води з поверхневих джерел для потреб теплосилових установок і встановлення ефективності окремих технологічних операцій (фільтрування, окиснення та

коагуляції) з використанням випробувальної промислової установки на основі фільтруючого матеріалу AFM виробництва компанії Dryden Aqua.

Матеріали і методи. Методи досліджень — аналітичні, хімічні, фізико-хімічні з використанням приладів і методик досліджень якості води згідно ДСанПіН 2.2.4-171-10 та ДСТУ 7525:2014.

Під час експериментальних досліджень використовували завантаження для фільтрування AFM[®], що являє собою штучний фільтрувальний матеріал алюмосилікат (скло) у діапазоні розмірів часток завантаження 4,0—0,4 мм (Фільтруючий матеріал AFM).

Для очищення води використовували такі хімічні реагенти:

- 1) сульфат алюмінію $Al_2(SO_4)_3$;
- 2) розчин гідроксихлориду алюмінію — $Al_2(OH)_nCl_{6-n}$ (конц. Al_2O_3 — 17%), марки ITS WATER[™] AC-114;
- 3) розчин хлориду заліза (конц. $FeCl_3$ 40—47%), марки ITS WATER[™] FC-117;
- 4) гіпохлорит марки А (конц. активного хлору не менше 190 г/дм³).

Під час експерименту також проводили визначення прозорості водяного стовпа, контроль робочого тиску за допомогою манометрів, швидкості фільтрації за допомогою ротаметра.

Викладення основних результатів дослідження. Під час вибору раціональної технологічної схеми для очищення поверхневих вод важливо забезпечити високу ефективність очищення, можливість регулювання основних технологічних параметрів, конструктивну простоту обладнання й тривалий термін його роботи. Для забезпечення необхідної ефективності очищення води важливо визначити необхідні дози реагентів, що залежить від властивостей дисперсної системи: температури, кількості зважених і колоїдно-дисперсних речовин, забарвленості, іонного складу, значення рН та інших фізико-хімічних показників води (Гусятинська, Деменюк, & Шульга, 2022).

У лабораторії було проведені попередні порівняльні випробування двох коагулянтів — сульфату алюмінію та гідроксихлориду алюмінію (марки ITS WATER[™] AC-114) у разі використання води з поверхневого джерела (р. Дніпро). Результати експериментальних досліджень наведено в табл. 1, 2.

Таблиця 1. Показники якості води при обробці сульфатом алюмінію

Показники	Доза алюміній сульфату, мг/дм ³				
	Вода без очищення	25	50	100	150
Забарвленість, град	41,0 ± 2,0	36,0 ± 2,0	35,0 ± 1,8	18,0 ± 1,0	15,0 ± 1,0
Каламутність, НОК	3,8 ± 0,4	1,18 ± 0,2	0,99 ± 0,2	0,71 ± 0,2	0,7 ± 0,15
Вміст загального заліза, мг/дм ³	0,39 ± 0,05	0,19 ± 0,02	0,22 ± 0,02	0,09 ± 0,02	0,1 ± 0,02
Перманганатна окиснюваність, мг O_2 /дм ³	12,16 ± 0,6	11,84 ± 0,5	10,72 ± 0,4	6,72 ± 0,2	6,72 ± 0,2

Таблиця 2. Показники якості води при обробці гідроксохлоридом алюмінію

Показники	Доза гідроксохлориду алюмінію, мг/дм ³				
	0	40	80	120	160
Забарвленість, град	41,0 ± 2,0	26,1 ± 1,8	9,0 ± 1,5	8,1 ± 1,5	8,0 ± 1,4
Каламутність, НОК	3,8 ± 0,4	1,18 ± 0,2	0,42 ± 0,2	0,4 ± 0,2	0,23 ± 0,15
Вміст загального заліза, мг/дм ³	0,39 ± 0,05	0,13 ± 0,02	0,09 ± 0,01	0,03 ± 0,01	0,05 ± 0,01
Перманганатна окиснюваність, мг О ₂ /дм ³	12,16 ± 0,6	7,36 ± 0,5	6,56 ± 0,3	4,48 ± 0,2	4,16 ± 0,2

Отже, за результатами експериментальних досліджень встановлено вищу ефективність гідроксохлориду алюмінію порівняно із сульфатом алюмінію. Відповідно, на основі отриманих результатів для подальших напівпромислових досліджень було обрано гідроксохлорид алюмінію.

Для реалізації попереднього очищення води для теплових установок харчових підприємств розроблена принципова технологічна схема, що включає такі стадії очищення води: 1) окиснення (дезінфекція) гіпохлоритом натрію; 2) фільтрація з метою видалення домішок розміром більше 130 мкм; 3) коагуляційне освітлення води з використанням напірної фільтрації на завантаженні типу АФМ. Для реалізації запропонованої технології на підприємстві ТОВ «ФАЗОР» змонтовано випробувальну установку (рис. 1).

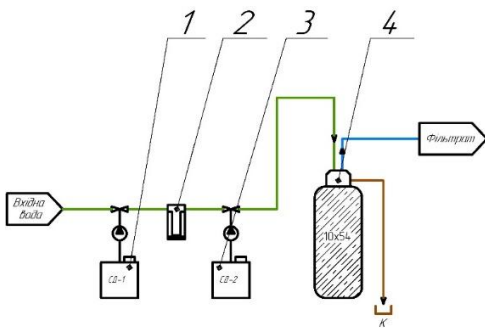


Рис. 1. Схема установки: 1 — станція дозування гіпохлориту натрію; 2 — дисковий фільтр 130 мкм; 3 — станція дозування коагулянту; 4 — мультимедійний фільтр, завантажений 3-ма фракціями АФМ

Принцип роботи установки для попереднього очищення природної води з поверхневих джерел полягає в тому, що вода з поверхневого джерела подається насосом безпосередньо на експериментальну установку, де у трубопроводі додається гіпохлорит натрію за допомогою автоматичної станції дозування (1). Обробка води

гіпохлоритом натрію забезпечує процеси хімічного окиснення органічних домішок і дезінфекції від мікроорганізмів, що містяться у вхідній воді. Після цього вода надходить на дисковий фільтр (2) з рейтингом фільтрації 130 мкм для відділення зважених домішок. Вода після грубого фільтрування надходить у фільтрувальну колону (4) із завантаженням AFM, яке складається з трьох фракцій, зокрема з підтримуючого шару розміром 2—4 мм, далі розміщуються шари з фракціями 0,7—2 мм та 0,4—0,8 мм. Попередньо до води, за допомогою дозатора (3), додається розчин коагулянту (гідроксохлорид алюмінію або хлорид заліза) для забезпечення перебігу процесу коагуляції колоїдних речовин, одержання та осадження укрупнених міцел осаду, що відбувається під час проходження через фільтруючий шар AFM у фільтрувальній колоні. За допомогою ротаметра забезпечується підтримання певного навантаження води під час проходження через фільтрувальну колону (типорозміру 10×54 з площею фільтрації 0,05 м²) в межах 0,4—0,5 м³/год, що відповідає швидкості фільтрації 8—10 м/год.

Процес коагуляції високомолекулярних сполук і речовин колоїдної дисперсності в технології очищення води включає дві основних стадії: перша — швидке змішування з реагентом, що відповідно до розробленої схеми забезпечується введенням коагулянту у трубопровід подачі води до фільтраційної колоні, де внаслідок турбулентного руху відбувається швидке розподілення реагенту в об'ємі води. На другій стадії важливо забезпечити умови стабілізації зважених частинок та утворення міцел осаду, що досягається зменшенням швидкості потоку у фільтраційній колоні і, відповідно, перебігу процесу контактної коагуляції. Використання процесу контактної коагуляції, що відбувається на завантаженні, має ряд переваг, зокрема: компактні габарити апаратурного виконання порівняно з класичною схемою відстоювання та фільтрації; можливість забезпечення достатньо високої і стабільної ефективності при різних фізико-хімічних умовах коагуляції, що змінюються за сезонами року; зменшення доз коагулянту (Душенко, & Ткачук, 2024). Слід зазначити, що завантаження AFM[®] використовується як фільтруюче середовище при одно- або двокомпонентній фільтрації як у відкритих (RGF), так і в закритих (напірних) фільтрах для очищення води з різних джерел, таких як ґрунтові води, поверхневі води, морська вода та стічні води. AFM[®] має оптимізовану форму та розміри частинок для фільтрації. Також AFM[®] не є пасивним фільтруючим середовищем — його поверхня активується за допомогою хімічної та термічної обробки в процесі, подібному до сольгелю, де структура поверхні кожного зерна матеріалу змінюється, що призводить до появи стійкої поверхні матеріалу до біозаростання, а також збільшення активної площі фільтрації матеріалу (фільтруючий матеріал AFMS).

Випробувальна установка оснащена контрольно-вимірювальними приладами та засобами автоматики (насоси дозатори — 2 шт.; ручний клапан керування роботою фільтраційної колоні; ротаметр на лінії фільтрату; манометри, встановлені до та після фільтрувальної колоні), а також трубопроводами з відповідною запірною арматурою.

У процесі виконання дослідження було визначено ефективність застосування фільтрувального матеріалу AFM та якісних показників води під час робочого режиму пілотної установки з комбінацією реагентів: 1 варіант — гідроксохлорид алюмінію та гіпохлорит натрію; 2 варіант — хлориду заліза та гіпохлориту натрію.

Як об'єкт дослідження використовували воду з поверхневого джерела р. Кам'янка. В табл. 3 наведено показники якості вхідної води з поверхневого джерела (річка) в літній період, коли проводилося дослідження.

Слід зазначити, що вода з поверхневого джерела характеризувалася високим показниками забарвленості (79,00 град.), каламутності (17,30 мг/дм³), вмісту заліза (0,566 мг/дм³), перманганатної окиснюваності (17,6 мг/дм³).

Таблиця 3. Показники якості вхідної води

Найменування показника	Значення	
	фактичне	за ДСанПІН 2.2.4-171-10*
Запах при 20 °С, бали	5	<2
рН	7,46	6,5—8,5
Забарвленість, град.	79,00	<20
Каламутність, мг/дм ³	17,30	<0,58
Жорсткість загальна, мг-екв/дм ³	7,350	<7
Кальцій, мг-екв/дм ³	4,300	не регл.
Магній, мг-екв/дм ³	3,050	не регл.
Лужність загальна, мг-екв/дм ³	6,720	не регл.
Залізо загальне, мг/дм ³	0,566	<0,2
Марганець, мг/дм ³	0,632	<0,05
Сульфати, мг/дм ³	12,00	<250
Хлориди, мг/дм ³	53,00	<250
Гідрокарбонати, мг/дм ³	410,00	не регл.
Перманганатна окиснюваність, мг/дм ³	17,60	<5
Запах при 60 °С, бали	5	<2

У табл. 4 представлено показники якості води після очищення.

Таблиця 4. Усереднені результати аналізу очищеної води на модульній установці для випробувань за різних варіантів очищення

Найменування показника	Значення			
	гідроксохлорид алюмінію та гіпохлорит натрію	ефективність видалення, %	хлорид заліза та гіпохлорит натрію	ефективність видалення, %
рН	7,66	—	6,93	—
Забарвленість, град.	21,00	73,4	25,00	68,4
Каламутність, мг/дм ³	0,20	98,8	0,30	98,3
Жорсткість загальна, мг-екв/дм ³	6,400	12,9	6,720	8,57
Лужність загальна, мг-екв/дм ³	5,360	20,2	3,600	46,4
Залізо загальне, мг/дм ³	0,024	95,8	0,033	94,2
Марганець, мг/дм ³	0,010	98,4	0,010	98,4
Перманганатна окиснюваність, мг/дм ³	8,10	54	5,30	69,9

Важливим етапом у процесі фільтрування через зернисте завантаження є видалення осаду шляхом зворотного промивання, що забезпечує ефективне прояснення води за оптимального значення перепаду тиску. Важливим показником для автоматизації процесу фільтрування є визначення тривалості робочого циклу та промивки фільтра. На рис. 2 представлено залежність зміни тиску ΔP води до та після фільтра. З наведеної діаграми випливає, що за тривалості фільтрування та контактної коагуляції (за середніх витрат коагулянту 20—40 мг/дм³) протягом 140—150 хв перепад тиску збільшується з 0,2 бар до 0,8—1,0 бар, що є свідченням накопичення осаду в об'ємі фільтраційного завантаження і показником щодо необхідності проведення промивки фільтра.

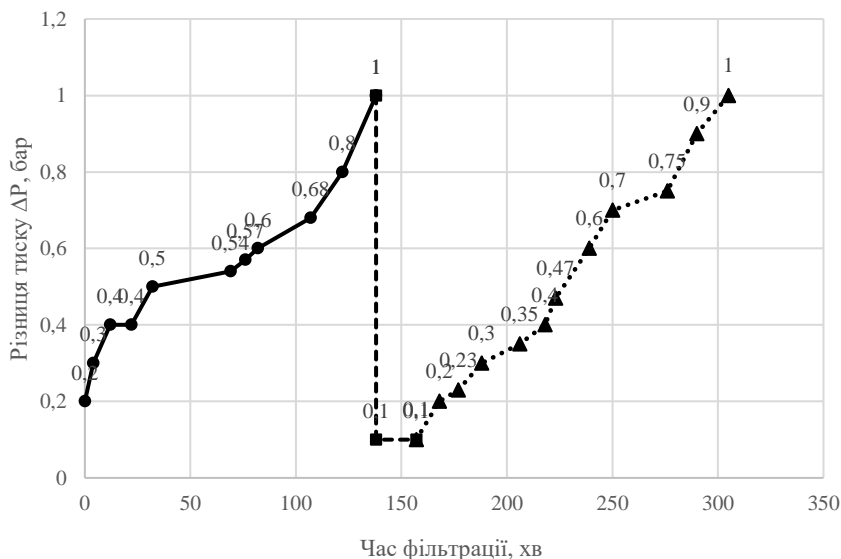


Рис. 2. Залежність різниці тиску ΔP від тривалості процесу фільтрації: ● — перший фільтроцикл; ■ — зворотна промивка; ▲ — другий фільтроцикл

На основі експериментальних досліджень розробленої напівпромислової установки встановлено, що раціональна тривалість процесу фільтроциклу під час контактної коагуляції на завантаженні АФМ, яке складається з трьох фракцій (з підтримуючого прошарку розміром 2—4 мм і прошарків з фракціями 0,7—2 мм та 0,4—0,8 мм) становить 140—150 хв. При цьому зниження тиску після фільтра становило до 1,0 бар. Подальше фільтрування за таких умов призводить до погіршення якості води та зниження ефективності фільтраційного завантаження, що проявляється у погіршенні якості фільтрату внаслідок виносу затриманих забруднень. Для регенерації завантаження рекомендується зворотне промивання чистою водою протягом 10—20 хв, що в цілому забезпечувало повне очищення завантаження, про що свідчать результати вимірювання тиску в системі до та після промивки (рис. 2).

Висновки

За результатами випробувань встановлено, що застосування запропонованої технології очищення води з використанням контактної коагуляції, при використанні

комбінації реагентів: гіпохлорит + коагулянт і мультимедійного завантаження AFM, забезпечує стабільний результат попереднього очищення за лінійної швидкості фільтрації порядку 8—10 м/год.

Вперше визначено раціональну тривалість фільтроциклу 140—150 хв для багатшарового завантаження AFM (з розмірами фракцій 2—4 мм, 0,7—2 мм та 0,4—0,8 мм) до досягнення значення різниці тисків в межах до 1 бар. У разі подальшої фільтрації без промивання відбувається погіршення якості очищеної води і, відповідно, ефективності фільтраційного завантаження щодо утримання диспергованих часток забруднень. Тож при досягненні перепаду тиску в 1 бар необхідно проводити зворотне промивання для відновлення оптимального робочої різниці тиску 0,2—0,8 бар.

Основною перевагою цієї перспективної апаратурно-технологічної схеми є її висока продуктивність при відносно компактних габаритах обладнання порівняно до класичної технології, в якій наявні габаритні відстійники, що є досить капітально затратними спорудами при невеликій продуктивності. На основі випробування схеми у промислових умовах було підтверджено її ефективність для реалізації стадії попередньої підготовки води перед подачею на подальше очищення шляхом іонообмінного пом'якшення.

Проведені теоретичні й експериментальні дослідження підтвердили можливість використання розробленого способу, що ґрунтується на процесі контактної коагуляції з використанням сучасного багатшарового завантаження AFM, для попереднього очищення води теплогенераційних установок невеликої продуктивності, що використовують як живильну воду поверхневі джерела водопостачання або оборотні системи виробничих вод. Ефективність способу очищення води з використанням фільтруючого матеріалу AFM для контактної коагуляції забезпечується шляхом зменшення витрати коагулянтів із збереженням якості очищеної води. Запропонований спосіб може бути використаний в різних схемах водопідготовки та очищення вод харчових підприємств.

Література

- Айрапетян, Т. С., Чуб, І. М. (2024). *Водопідготовка на підприємствах теплоенергетики з використанням Na-катіонітових фільтрів: монографія*. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова.
- Бабієнко, В., Мокієнко, А. (2021). *Гігієна води та водопостачання населених місць: навчальний посібник*. Одеса: Прес-кур'єр.
- Гусятинська, Н. А., Деменюк, О. М., Шульга, С. А. (2022). Ефективність застосування поліоксихлориду алюмінію для очищення питної води. *Наукові праці НУХТ*, 28(6), 125—136.
- Долина, Л. Ф., Машихіна, П. Б., Козачина, В. А. (2021). *Реконструкція систем водопостачання та водовідведення: монографія*. Дніпро: Журфонд.
- Долінський, А. А., Ободович, О. М., Сидоренко, В. В., Гусятинська, Н. А. (2018). Реалії сьогодення та перспективи майбутнього підготовки питної і технологічної води. *Наукові праці НУХТ*, 24(2), 247—255.
- Долінський, А., Ободович, О., Сидоренко, В., Лимар, А. (2021). Особливості водопідготовки для котельних. *Теплофізика та Теплоенергетика*, 43(4), 17—24. <https://doi.org/https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2021.2>.
- Душенко, О., Ткачук, В. (2024). Обладнання вхідної магнітно-кавітаційної підготовки води для тепломереж. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*, 337, 3(2), 73—80. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-337-3-10>.

Макаренко, І., Крисенко, Т., Глушко, О. (2024). Пом'якшення води в процесах водопідготовки виробництв косметичних засобів. *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Людина. Суспільство»*. <https://doi.org/10.20535/ehs2710-3315.2023.291013>.

Ободович, О. М., Переяславцева, О. О., Степанова, О. Є., Чернявський, К. Є. (2024). Підвищення надійності та подовження ресурсу котлів шляхом використання механізмів дискретно-імпульсного введення енергії. Збірник тез доповідей XXXIV Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів». Київ: «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

Ободович О., Целень Б., Переяславцева О., Степанова Л. (2024). Дискретно-імпульсне введення енергії — ефективний метод видалення гідрокарбонату кальцію та зменшення жорсткості води. *Теплофізика та теплоенергетика*, 46, 3. <https://doi.org/10.31472/tpe.3.2024.4>.

Поржезінський, Ю. (2019). Використання REDOX-к фільтрів і фосфонатів у підготовці води для теплових мереж і водогрійних котлів. *Перспективи майбутнього та реалії сьогодення в технологіях водопідготовки: матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції*, м. Київ, 14—15 листопада. Київ: НУХТ.

Поржезінський, Ю. Г. (2020). Нові технологічні рішення у підготовці води для водогрійних котлів і теплових мереж. *Наукові праці НУХТ*, 26(1), 91—97.

Сербов, М. Г., Згадова, Н. С. (2021). Інноваційний потенціал прісноводних ресурсів України: стан, регіональні особливості та перспективи розвитку. *Український журнал прикладної економіки*, 6(3), 116—122. <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2021-3-15>.

Фільтруючий матеріал AFMS. Взято з: <https://www.drydenaqua.com/afm/afm>.

Delpa, I., Jung, A.-V., Baures, E., Clement, M., Thomas, O. (2009). Impacts of climate change on surface water quality in relation to drinking water production. *Environment International*, 35, 8, 1225—1233. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.07.001>.

Gomelya, M., Hrabitchenko, V., Trokhymenko, A., & Shablii, T. (2016). Research into ion exchange softening of highly mineralized waters. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4, 10(82), 4. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.75338>.

Kovalenko, T. P., Lys, S. S., Serdiuk, V. O., Galyanchuk, I. R., Lashkovska, N. M. (2019). Аналіз ефективності роботи модернізованої водопідготовчої установки котельні підприємства. *Scientific Bulletin of UNFU*, 29(6), 87—91. <https://doi.org/10.15421/40290618>.

Obodovych, O., Sydorenko, V., Tselen, B., Rezakova, T. (2023). Method of reducing water hardness salts and heat and mass exchange equipment for its implementation. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 45(2), 87—94. <https://doi.org/https://doi.org/10.31472/tpe.2.2023.10>.

Ospanova, D., Nussupbekov, B., Kutum, B., Oshanov, Y. (2023). Research of process water of a thermal power plant. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2, 6(122), 53—61. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.276486>.

Pivokonsky, M., Novotna, K., Petricek, R., Cermakova, L., Prokopova, M., & Naceradska, J. (2023). The impact of algal organic matter on water treatment plant operation and water quality: A comprehensive study. *Journal of Water Process Engineering*, 104660. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104660>.

Shaheen, R., & Cséfalvay, E. (2023). Investigation of coagulation and microfiltration for Danube water as the first step of make-up water production. *Chemical Papers*, 77(9), 5531—5539. <https://doi.org/10.1007/s11696-023-02883-4>.