

АЕРАЦІЙНО-ОКИСЛЮВАЛЬНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ПІДГОТОВКИ ПИТНОЇ І ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ВОДИ

Ободович О. М.¹, д.т.н., с.н.с., зав. відділом
<https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>

Целень Б. Я.¹, к.т.н., с.н.с.,
<https://orcid.org/0000-0001-5213-0219>

Сидоренко В. В.¹, к.т.н., с.н.с.,
<https://orcid.org/0000-0001-7735-7719>

Степанова О. Є.¹, к.т.н.,
<https://orcid.org/0000-0002-7179-7251>

Шейко Т. В.², к.т.н., учена секретарка,
<https://orcid.org/0000-0002-0559-1335>

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, Київ, Україна

²Інститут продовольчих ресурсів НААН, Київ, Україна

<https://doi.org/10.31073/foodresources2023-21-12>

Предмет. На даний момент в Україні постають питання щодо одночасного виконання завдань з оптимізації водопостачання всіх галузей промисловості, технологічні процеси в яких потребують використання води лише для питних потреб. Тому необхідно впроваджувати енергозберігаюче тепломасообмінне обладнання для підготовки питної та технічної води. **Мета.** Вдосконалення процесів очищення води від заліза, марганцю, сірководню, вуглекислого газу та інших речовин методом дискретно-імпульсного підведення енергії, що інтенсифікує процеси масо-і теплообміну. **Метод.** Для цього було визначено: вплив кількості циклів обробки при різних швидкостях обертання ротора на зміну концентрації іонів заліза у воді; вплив кількості циклів обробки при різних частотах пульсації на зміну концентрації іонів заліза у воді; вплив кількості циклів обробки при різних швидкостях зсуву потоку на зміну концентрації іонів заліза у воді. **Результати.** У статті аналізуються екологічні проблеми України, пов'язані із забрудненням річки Дніпро як основного джерела господарсько-питного та технічного водопостачання. Неодбале ставлення до проблеми підготовки питної води, через велику кількість стічних вод низького ступеня очищення, які скидають підприємства промислового та сільськогосподарського комплексів, річка Дніпро опинилася на межі екологічної катастрофи. Обґрунтовано необхідність збільшення використання артезіанських вод, коротко описано відомі способи та обладнання для очищення артезіанських вод. Представлено нове технологічне тепломасообмінне обладнання для інтенсифікації процесу очищення артезіанської води від заліза, марганцю, сірководню, вуглекислого газу, фтору, наведено його енергетичні та технологічні показники і порівняльну характеристику пропонованої установки. **Сфера застосування.** Результати проведених досліджень та отримані дані свідчать про те, що використання водоочисної установки порівняно з іншими пристроями дозволяє зменшити енерговитрати в 15–20 разів і інтенсифікувати процес підготовки питної та технічної води.

Ключові слова: артезіанська вода, очищення води, аератор-окислювач, частота пульсації, швидкість зсуву.

AERATION AND OXIDATION EQUIPMENT FOR PREPARATION OF DRINKING AND PROCESS WATER

Olexandr Obodovych¹, D-r of Sc., Engineering, Senior Researcher, Head of Department,
<https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>

Bohdan Tselen¹, PhD, Engineering, Senior Researcher
<https://orcid.org/0000-0001-5213-0219>

Vitalii Sydorenko¹, PhD, Engineering, Senior Researcher
<https://orcid.org/0000-0001-7735-7719>

*Olesya Stepanova*¹, PhD, Engineering,<https://orcid.org/0000-0002-7179-7251>*Tamila Sheiko*², PhD, Engineering, Scientific Secretary<https://orcid.org/0000-0002-0559-1335>¹Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine²Institute of Food Resources of NAAS, Kyiv, Ukraine<https://doi.org/10.31073/foodresources2023-21-12>

Subject. At the moment, questions arise in Ukraine regarding the simultaneous implementation of tasks to optimize the water supply of all industries, technological processes in which the use of water is only for drinking needs. Therefore, it is necessary to implement energy-saving heat and mass exchange equipment for the preparation of drinking and technical water. **Purpose.** Improve the processes of water purification from iron, manganese, hydrogen sulfide, carbon dioxide and other substances by the method of discrete-pulse energy supply, which intensifies the processes of mass and heat exchange. **Methods.** To do this, the following was determined: the influence of the number of processing cycles at different speeds of rotation of the rotor on the change in the concentration of iron ions in water; the effect of the number of processing cycles at different pulsation frequencies on the change in the concentration of iron ions in water; the influence of the number of processing cycles at different flow shear rates on the change in the concentration of iron ions in water. **Results.** The article analyzes the ecological problems of Ukraine related to the pollution of the Dnipro River as the main source of economic, drinking and technical water supply. Careless attitude to the problem of preparation of drinking water, due to a large amount of wastewater of a low degree of purification discharged by enterprises of industrial and agricultural complexes, the Dnipro River was on the verge of an ecological disaster. The need to increase the use of artesian waters is substantiated, known methods and equipment for cleaning artesian waters are briefly described. New technological heat and mass exchange equipment for intensifying the process of purifying artesian water from iron, manganese, hydrogen sulfide, carbon dioxide, fluorine is presented, its energy and technological indicators and comparative characteristics of the proposed installation are given. **Scope of results.** The results of the conducted research and the obtained data indicate that the use of a water treatment plant compared to other devices allows reducing energy consumption by 15–20 times and intensifying the process of preparing drinking and technical water.

Key words: artesian water, water purification, aerator-oxidizer, pulsation frequency, shear rate.

Постановка проблеми. Вода – важливий елемент життя, без води не було б ніякої екосистеми. Вона відіграє найважливішу роль, оскільки бере участь у багатьох різних механізмах і процесах на Землі. Питна вода – один із найцінніших стратегічних ресурсів кожної країни. Від її якості безпосередньо залежить здоров'я та життя людей [1]. Стандарт якості питної води затверджений Всесвітньою організацією охорони здоров'я (ВООЗ) і оцінює склад води за низкою характеристик. Відхилення від цього стандарту, як показують наукові дані на підставі багаторічних спостережень, призводить до несприятливих короткострокових і довгострокових наслідків для здоров'я і добробуту населення [2]. Крім збалансованості хімічного складу, питна вода, щоб бути корисною для людини, має бути незабрудненою – тобто, не містити жодних патогенних мікроорганізмів, а також сторонніх продуктів людської діяльності, зокрема радіоактивних і токсичних хімічних речовин. Забезпечення населення і виробництва якісною водою є основою гармонійного соціально-економічного розвитку суспільства. Актуальність даної проблеми зростає під час військової агресії, коли в результаті аварії на Каховській ГЕС, руйнувань енергооб'єктів, водозабірних і водоочисних споруд порушується робота централізованих систем водопостачання, відведення та очищення стічних вод, також внаслідок деградації природних водойм через значний антропогенний тиск.

За прогнозами ООН, до середини третього десятиліття XXI ст. понад 4 мільярди людей відчуватимуть брак питної води, що пов'язано як зі зміною клімату, так і з діяльністю людини. Сьогодні додатковому очищенню піддається близько 90% поверхневих і 30% підземних вод, які забираються для потреб водопостачання [3].

У Загальнодержавній програмі “Питна вода України” на 2006–2020 роки [4] визначені пріоритетні напрями державної політики щодо забезпечення населення якісною питною водою, але оскільки зазначені засади носять лише загальний характер, їх реалізація неможлива без розробки наукового-методичного апарату обґрунтування організаційних заходів, узгоджених з вимогами забезпечення екологічної безпеки міста, врахування дії факторів, що найбільш суттєво впливають на якість питної води, та впровадження ринкових умов господарювання [5].

Близько 80% води українці споживають з поверхневих джерел (річок, озер та водосховищ; насамперед – з річок Дніпро і Дністер), а 20% – із підземних. Як вважають експерти, якість дніпровської та дністрової води є доволі низькою. У ці річки, як і в більшості інших українських водойм, скидають велику кількість неочищених стічних вод, побутових і промислових відходів, сюди ж змиваються дощами пестициди, нітрати, нітроти, солі важких металів тощо [2]. Майже всі поверхневі джерела водопостачання в Україні за рівнем забруднення наближаються до 3 класу якості (розбавлені стічні води), а за міжнародною класифікацією – до 4 класу (стічні води) [6].

За загальним забрудненням вода в західних регіонах вважається чистішою, ніж у східних та південних, де люди часом змушені пити технічну воду, відхилення від норми якої становить до 80%. Найбільш чистими регіонами, з точки зору питної води, є західні області України (окрім Львова). Досить сприятлива ситуація в Сумській, Полтавській та Чернігівській областях. Втім, практично всі поверхневі, а в окремих регіонах і підземні води в Україні за рівнем забруднення не відповідають вимогам стандарту на джерела водопостачання. За даними Українського державного науково-дослідного інституту “УкрВОДГЕО” 69% всієї питної води, яка постачається в оселі українців, не відповідає встановленим санітарним нормам. Очисні споруди і технологія очищення води – застаріли і не оновлюються. Понад 800 тисяч українців проживають у населених пунктах, де заборонено пити місцеву воду через природні або техногенні причини або через відсутність місцевих джерел водопостачання [2].

За даними Міністерства охорони природи та навколишнього середовища України стан 44% річок, що впадають у Дніпро, визнаний катастрофічним, а вода в них – дуже забруднена. Через відсутність державного фінансування в Україні останніми роками не виконувалася ухвалена ще 1997 року Національна програма екологічного оздоровлення басейну Дніпра та поліпшення якості питної води.

Значну роль у деградації екологічної ситуації в басейні відіграють вирубування лісів, “хімізація” сільського господарства, гідромеліорація, створення та функціонування каскаду дніпровських водосховищ, інтенсивне використання водних ресурсів і скидання значних обсягів забруднених вод. Дніпро є основним джерелом водопостачання великих промислових центрів у межах басейну, а також Півдня та Південного Сходу країни. Гідрохімічний стан водосховищ Дніпровського каскаду і водотоків басейну останніми роками має тенденцію до погіршення. Хімічне та біологічне споживання кисню, вміст марганцю та заліза, а також кольоровість Дніпровської води значно перевищують нормативні значення, встановлені для господарсько-питного водоспоживання. Через низьку якість очищення промислових, сільськогосподарських, побутових, зливових стічних вод надходження забруднених стоків у поверхневі водойми не зменшується.

У Дніпрі щорічно близько 10 тис. підприємств скидають понад 10 км³ стічних вод, з яких 15% є шкідливі води, тобто скинуті без будь-якої очистки. Вода річки забруднена отрутохімікатами: сполуками важких і радіоактивних металів, особливо після аварії на Чорнобильській АЕС, пестицидами. Актуальною проблемою каскаду дніпровських водосховищ і особливо для Нижнього Дніпра є погіршення властивостей води в результаті евтрофікації водойм (“цвітіння” води) – різкого підвищення біологічної продуктивності синьо-зелених водоростей (найчастіше спровокованої антропогенною діяльністю), що здійснює біологічне забруднення водойм обумовлене накопиченням у водній масі

з'єднань біогенних речовин – сполук фосфору й азоту, які спричиняють різке зниження вмісту кисню у воді, підвищення рН, випадання в осад карбонату кальцію, гідроксиду магнію, що призводить до негативних наслідків для всієї екосистеми водойми [7].

За словами академіка НАН В. В. Гончарука, директора Інституту колоїдної хімії та хімії води імені А. В. Думанського, артезіанські підземні води є найбільш надійно захищеним від антропогенного впливу джерелом питної води [6]. Менш схильними до сезонних коливань, краще захищеними від небезпеки забруднення та інфекції, більш рівномірно поширені по території, на відміну від поверхневих вод, являються підземні води. Вони представляють собою складні багатокомпонентні системи, що містять цілий комплекс неорганічних і органічних речовин, газів, мікрофлори. Концентрація мінеральних солей у цих водах залежить від умов їх утворення.

Тому через недбале ставлення до проблеми підготовки питної води, через велику кількість стічних вод низького ступеня очищення, які скидають підприємства промислового та сільськогосподарського комплексів, річка Дніпро опинилася на межі екологічної катастрофи.

Грунтові води залягають на невеликій глибині. Вони схильні до негативного впливу природних і техногенних факторів. Грунтові води брудні та солоні. Принципова відмінність артезіанських вод – вони знаходяться набагато глибше за ґрунтові води, прісні за складом, надійно захищені від негативного впливу ззовні. Грунтові води очистити складніше, тоді як для очищення артезіанської води знадобиться нескладний технологічний процес на основі фільтрів тонкого та грубого очищення.

Підземні води характеризуються вищою якістю, на відміну від поверхневих, яка може не відповідати нормативним вимогам щодо вмісту окремих елементів. Використання такої води для пиття неможливе без попереднього очищення.

Волино-Подільський, Дніпровсько-Донецький і Чорноморський є найбільшими артезіанськими басейнами на території України. Найбільш забрудненими вважаються артезіанські води на території Луганської, Донецької та Дніпровської областей. Забруднення водоносних горизонтів пов'язують із порушенням технічних умов під час буріння та експлуатації артезіанських свердловин. Ось чому в районах, де ведеться активне землеробство, рекомендується використовувати фільтри для води. Крім механічних домішок, вони дають змогу видалити пестициди. Склад артезіанських вод більш схожий із глибинними ґрунтовими водами, оскільки вони не містять органіки, майже не містять кисню. Водні джерела артезіанського типу знаходяться на глибині 100-1000 м. Артезіанська вода може знаходитись під кількома водоносними шарами [8]. Артезіанська вода міститься в глибоких шарах землі і зазвичай виходить на поверхню під тиском. Запаси артезіанської води зосереджені в западинах, флексурах або інших геологічних структурах, що утворюють артезіанські басейни (рис. 1).



Рис. 1. Схема поширення підземних вод

Хімічний склад цього типу води залежить безпосередньо від складу пластів Землі, між якими знаходиться водоносний горизонт, і від часу залягання води, як правило, це мільйони років. Головним чином на склад ґрунтових вод впливають опади, паводки, і навіть техногенні чинники: забруднення стічних вод, використання добрив, пестицидів тощо в сільському господарстві. Глибинні ґрунтові води менш схильні до змін, своєю чергою склад поверхневих ґрунтових вод змінюється протягом короткого періоду. Артезіанські води практично не змінюють свій склад весь термін експлуатації свердловини.

Склад шарів земної кори і час перебування між ними артезіанської води дуже впливає на її якість. Серед недоліків цього типу води слід відзначити те, що при контакті з підземними мінералами, вона збагачується різними солями, мікро- і макроелементами в концентраціях, які зазвичай перевищують гранично допустимі норми (ГДК). Артезіанська вода часто перенасичена залізом. Цей елемент поширений у корі Землі. Якщо залізо входить до складу водостійких шарів, що зціджують водоносний горизонт, артезіанська вода насичується іонами заліза (Fe). Також у складі ґрунту присутні карбонатні породи. Вони мають осадове походження та складаються з останків організмів, які населяли Землю у конкретний період. Кальцити та арагоніти насичують воду іонами кальцію (Ca), магнію (Mg). Концентрація перелічених речовин у воді артезіанського типу перевищує норму вдвічі та більше. Також у складі артезіанської води міститься велика кількість іонів марганцю (Mn), кремнію (Si), фосфору (P), калію (K) та сірки (S). Найчастіше артезіанська вода містить велику кількість заліза, марганцю, сірководню, вуглекислого газу, фтору. Для її очищення від цих сполук зазвичай використовують аераційно-окислювальні методи з подальшою фільтрацією.

До основних методів аераційного знезалізнення води належать: аерація з наступною фільтрацією через гранульований наповнювач; “глибока аерація” з подальшою фільтрацією; метод “Віредокс” (фільтрування в підземних умовах з попередньою подачею у пласт окислюваної води).

Спрощений спосіб аерації заснований на здатності води, що містить залізо (II) і розчинений кисень, при фільтруванні через зернистий шар (пісок, керамічну крихту, антрацит) виділяти залізо на поверхню зерен, в результаті чого утворюється каталітична плівка гідроксидів двовалентного і тривалентного заліза. Каталітична плівка інтенсифікує процеси окислення та виділення заліза з води [9].

Для збагачення води киснем застосовують різні способи. Наприклад, заливання води з висоти 0,5 м у карман фільтра зі швидкістю 2,5–3 м/с. За стехіометричним співвідношенням на окиснення 1 мг заліза (II) витрачається 0,143 мг кисню. Відповідно до оптимальних параметрів завантаження фільтра на установках знезалізнення для забезпечення достатньо високої швидкості хімічної реакції вміст кисню, розчиненого у воді, повинен становити 0,5...0,9 мг на 1 мг заліза (II). При необхідності одночасного збагачення води киснем і видалення частини вільного вуглекислого газу раціонально використовувати градирні. Як декарбонізатори градирні широко використовуються на ТЕЦ [10].

Для збагачення води повітрям раціонально використовувати водоповітряний ежектор. При цьому:

- тиск на манометрі перед ежектором – 320 кПа (3,2 атм);
- тиск на манометрі після ежектора – 80 кПа (0,8 атм);
- продуктивність ежектора по повітрю – 7,2 м³/год.;
- витрата води – 27 м³/год.

Зі збільшенням опору в фільтрувальному завантаженні та протитиску після ежектора його продуктивність знижується [11].

Фізико-хімічні процеси, що відбуваються при окисненні заліза (II) киснем у природній воді: перенесення кисню через межовий газовий дифузний шар до межі фаз

“вода-повітря”; перенесення кисню через межовий шар води від межі фаз “вода-повітря”; дифузія кисню в об’ємі води; гомогенна реакція окислення; гідроліз тривалентного заліза.

Мета досліджень – вдосконалення процесів очищення води від заліза, марганцю, сірководню, вуглекислого газу та інших речовин за рахунок використання методу дискретно-імпульсного введення енергії, що інтенсифікує процеси масо- і теплопереносу. В Інституті технічної теплофізики НАН України розроблено аераційно-окислювальну установку роторного типу (АОРТ), використання якої дозволяє досягти поставленої мети.

Поставлені наступні завдання для досягнення мети досліджень:

- визначення впливу кількості циклів обробки при різних швидкостях обертання ротора на зміну концентрації іонів заліза у воді;
- визначення впливу кількості циклів обробки при різних частотах пульсації на зміну концентрації іонів заліза у воді;
- визначення впливу кількості циклів обробки при різних швидкостях зсуву потоку на зміну концентрації іонів заліза у воді.

Для досліджень використовували воду зі свердловини глибиною 250 м. Очищення води здійснювали в аераційно-окислювальній установці роторного типу (АОРТ), в якій реалізується метод дискретно-імпульсного введення енергії.

Матеріали та методи. Знезалізнення води – процес масообміну, ускладнений хімічними реакціями. Швидкість переносу речовини і теплоти до зони реакції та швидкість реакції визначають параметр швидкості хімічного перетворення. Процеси масо- і теплообміну, що супроводжуються хімічною реакцією, можуть проходити в дифузійній, кінетичній або проміжній областях. В області дифузії процес обмежений швидкістю переносу теплоти і речовини в зоні реакції та реалізується при високих швидкостях хімічної реакції. І навпаки, процеси в кінетичній області, обмежені швидкістю хімічної реакції і відбуваються при високих швидкостях переносу теплоти та речовини в зону реакції.

Відповідно до зазначеного вище, процес знезалізнення води залежить від швидкості окислення заліза (II) киснем повітря у водному розчині, що, у свою чергу, залежить від швидкості масопереносу (розчинення і транспорт кисню) в області дифузії.

Аналіз літератури показав, що метод дискретно-імпульсного введення енергії інтенсифікує процеси масо- і теплопереносу [12, 13]. Тому, на основі цього методу для вдосконалення процесів очищення води від заліза, марганцю, сірководню, вуглекислого газу та інших речовин в Інституті технічної теплофізики НАН України розроблено роторну аераційно-окислювальну установку роторного типу (АОРТ) та дослідно-промислове обладнання (рис. 2, 3) [14].

Очищення води за розробленою схемою здійснюється наступним чином (рис. 2). В збірник-накопичувач 1 подається артезіанська вода, яка надходить на очистку. Вода надходить в аератор-окислювач 2 після відкриття двоходового крана. Подача повітря в приймальну трубу приладу здійснюється шляхом відкриття крана 8. Тому, в аератор-окислювач роторного типу надходить водно-повітряна суміш, в якій кисень розчиняється, а також частково реагує з окисненням Fe^{2+} до Fe^{3+} і гідролізом до $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Після цього водно-повітряна суміш надходить у фільтраційно-окислювальну колону 3, що заповнена піском або вугіллям різних фракцій (знизу крупна, зверху дрібна). У колоні відбуваються процеси остаточного окислення, гідролізу та очищення води від $\text{Fe}(\text{OH})_3$, що випадає в осад. Після колони вода, що очищена від заліза, проходить через розпилювальну головку для видалення вуглекислого газу. Знезалізована вода з нижньої частини ємності 1 через двоходовий кран 9 надходить у збірник очищеної води, а потім йде на реалізацію.

Звертаємо увагу, що знезалізнення води відбувається прямотоком за один прохід через роторний аератор-окислювач, фільтраційно-окислювальну колону і розширювальний бак. Для більш високого рівня очищення води від заліза установка може працювати в режимі рециркуляції.

Установка АОРТ випробувана в промислових умовах на Червонослобідському спиртзаводі концерну “Укрспирт”. Для технологічних потреб підприємство використовує воду з артезіанських свердловин глибиною 200...250 м, яка за фізико-хімічними показниками не відповідає вимогам ДСТУ до води питної. Вміст заліза у досліджуваній воді сягав 3,5 мг/л, а ГДК – 0,3 мг/л. Для зниження вмісту заліза у воді на заводі використовувалася аераційно-окислювальна установка роторного типу.

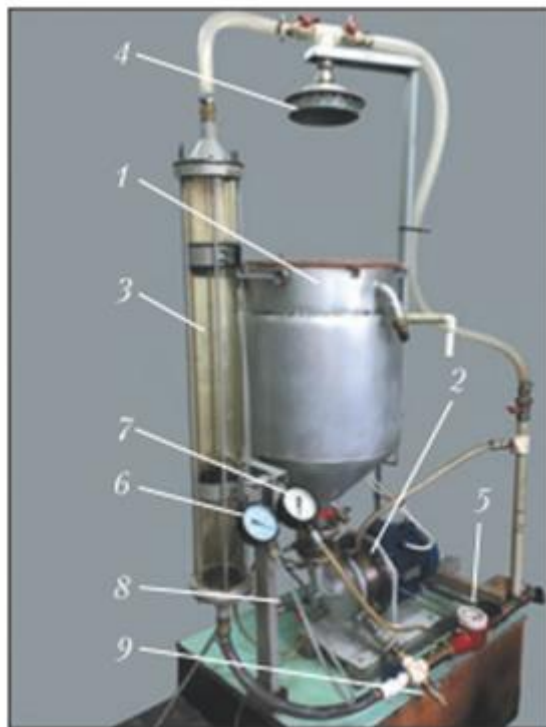


Рис. 2. Аераційно-окислювальна установка роторного типу (АОРТ):

- 1 – збірник-накопичувач; 2 – аератор-окиснювач; 3 – фільтраційно-окислювальна колона;
4 – розпилювальна головка; 5 – лічильник води; 6 – манометр; 7 – вакуумметр;
8 – кран подачі повітря; 9 – двоходовий кран



Рис. 3. Дослідно-промислове обладнання:

- 1 – аераційно-окислювальна установка; 2 – блок пуску та управління; 3 – проміжна ємність подачі води на фільтр; 4 – фільтр; 5 – збірник готової продукції

Результати та обговорення. В ході експерименту досліджено вплив конструктивних особливостей роторно-пульсаційної установки (РПУ) на ефективність знезалізнення води. Перший показник, що впливає на гідродинамічне середовище всередині аератора-окислювача, є кутова швидкість обертання ротора. В експерименті кутова швидкість ротора змінювалася від 35 до 55 об/с. Початкова концентрація іонів заліза в досліджуваному об'єкті становила 3,5 мг/л. Графік залежності концентрації іонів заліза у воді від кількості циклів обробки при різних швидкостях обертання ротора наведено на рис. 4.

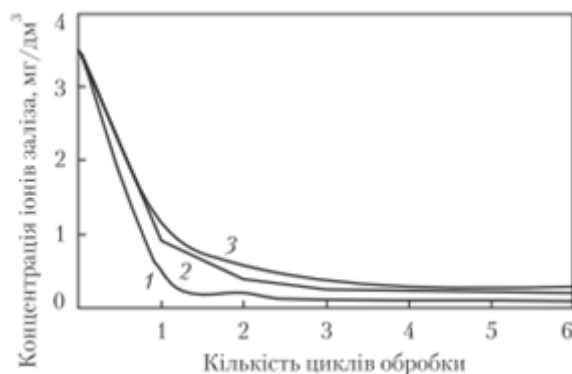


Рис. 4. Залежність зміни концентрації іонів заліза у воді від кількості циклів обробки за швидкостей обертання ротора: 1 – 55; 2 – 45; 3 – 35 об/с.

На рисунку 4 показано, що обробка води в аераторі-окислювачі може ефективно знизити концентрацію іонів заліза у воді. Так, при кутовій швидкості обертання ротора 55 об/с концентрація іонів заліза за один прохід води через робочі органи апарату (один цикл) зменшується з 3,5 до 0,25 мг/л. При зниженні кутової швидкості до 45 і 35 об/с необхідно збільшити кількість циклів обробки для досягнення бажаної концентрації іонів заліза ($\leq 0,3$ мг/л).

Ротор в аераторі-окислювачі виконаний у вигляді циліндра з поперечними щілинними отворами

розміром 20,0×30,0 мм (кількість отворів – 60). Статор, як і ротор, має стільки ж отворів. Зазор між статором і ротором становить 350 мкм.

Враховуючи особливості конструкції статора і ротора, вода в установці може оброблятися з різною частотою пульсації.

Також встановлено залежність концентрації заліза від кількості циклів обробки з різною частотою пульсацій (табл. 1). Початкова концентрація іонів заліза у воді становила 3,5 мг/л.

При аналізі даних таблиці 1 можна зробити висновок, що зміна частоти пульсацій потоку впливає на вміст у ньому іонів заліза. При обробці води з частотою пульсації 3 кГц концентрація іонів Fe за один цикл зменшується з 3,5 до 0,2 мг/л. При зниженні частоти пульсації до 2,5 кГц значення ГДК (0,3 мг/л) досягається за 2 цикли обробки. Подальше зниження частоти пульсації до 2,0 кГц не дає бажаного результату.

Залежність концентрації заліза від кількості циклів обробки з різною частотою пульсації наведена в табл. 1.

Таблиця 1

Залежність концентрації заліза від кількості циклів обробки за різної частоти пульсацій

Кількість циклів обробки	Концентрація іонів Fe, мг/л за частоти пульсацій		
	2,0 кГц	2,5 кГц	3,0 кГц
1	1,50	1,00	0,20
2	1,00	0,30	0,10
3	0,70	0,25	0,10
4	0,50	0,20	0,09

Іншим критерієм оцінки інтенсивності обробки води в окислювальному аераторі є швидкість зсуву потоку. Цей показник поєднує в собі дві величини: швидкість потоку в

радіальному напрямку і величину зазору між статором і ротором. Динаміка зміни концентрації іонів заліза у воді в залежності від кількості циклів обробки при різних швидкостях зсуву потоку наведена в табл. 2.

Таблиця 2

**Залежність концентрації заліза від кількості циклів обробки
за різної швидкості зсуву потоку**

Кількість циклів обробки	Концентрація іонів Fe, мг/л за швидкості зсуву потоку		
	$30 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$	$40 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$	$50 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$
1	1,70	0,80	0,25
2	1,10	0,30	0,10
3	0,70	0,25	0,08
4	0,25	0,15	0,08

Дані, наведені в табл. 2, показують, що зі збільшенням швидкості зсуву потоку від 30 до $50 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ швидкість знезалізнення води зростає в 4 рази. Так, при витраті $30 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ для знезалізнення води від 3,5 до 0,25 мг/л необхідно 4 цикли обробки, а при $50 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$ – один.

Доведено, що, керуючи гідродинамічними параметрами та змінюючи конструктивні особливості аератора-окислювача РПУ, можна регулювати динаміку та якість очищення артезіанських вод від сполук заліза.

У таблиці 3 наведені результати дослідів по очищенню артезіанської води від заліза, марганцю, сірководню і вуглекислого газу. Воду брали зі свердловини глибиною 250 м, розташованої в Київській області. Очищення проводили на установці АОРТ за один цикл при швидкості обертання РПУ 55 об/с і частоті пульсації 3 кГц.

Таблиця 3

Показники якості артезіанської води до і після очистки

Показники якості води	До очистки	Після очистки	ГДК Україна	ГДК ЄС
Fe, мг/л	5,2	0,17	0,3	0,2
Mn, мг/л	0,37	0,05	0,1	0,05
H ₂ S, мг/л	0,2	0,001	0,003	0,001
CO ₂ , мг/л	56,7	3,5	4,0	3,5
pH	6,0	7,2	6,5-8,5	6,5-8,5

З таблиці 3 видно, що за даних режимів обробки вміст зазначених речовин після очищення не перевищує ГДК, встановлених як в Україні, так і в країнах ЄС. Спосіб окислювально-каталітичного очищення пластових і стічних вод захищений патентом України [11].

Для оцінки ефективності установки визначено її енергетичні показники та проведено їх порівняльний аналіз. Найбільш близьким технічним рішенням до запропонованої установки є хвильовий гідродинамічний пристрій. Для порівняння також використовувалося обладнання для технології хімічного окислення. Порівняльні показники ефективності зазначених пристроїв наведені в табл. 4.

Висновки та рекомендації. Отримані дані переконливо доводять, що використання АОРТ для очищення води порівняно з вищезгаданими пристроями дає змогу зменшити споживання енергії в 15–20 разів. Такий технологічний та енергетичний ефект від очищення води в аераційно-окислювальній установці роторного типу пояснюється тим, що вона працює за методом дискретно-імпульсного введення енергії. Робота АОРТ полягає в тому, що водоповітряна суміш, проходячи через щілини і зазори РПУ аератора-

окислювача, зазнає дії ударних хвиль, міжфазної турбулентності, мікрокавітації, кумулятивних струменів, вихорів, які викликають нестійкості Релея-Тейлора або Кельвіна-Гельмгольца на міжфазних поверхнях, що призводить до інтенсивного дроблення повітряних бульбашок, значного збільшення загальної поверхні контакту фаз, інтенсифікації процесів масо- і теплопереносу. Подібних ефектів зазвичай неможливо досягти при використанні традиційних методів обробки дисперсних середовищ, навіть у разі значно більшого рівня питомих енерговитрат.

Таблиця 4

Енергетичні показники роботи аераційно-окислювальних пристроїв

Пристрої	Питомі енерговитрати, кВт·год/м ³
Аераційно-окислювальні:	
хвильовий гідродинамічний пристрій	4,50
АОРТ	0,30
Хімічного окиснення	5,54

Проведені дослідження дозволяють зробити висновок, що застосування нового тепломасообмінного обладнання у вигляді аераційно-окислювальної установки роторного типу дозволяє інтенсифікувати процес підготовки питної та технічної води і в кілька разів зменшити енергетичні витрати.

Бібліографія

1. Значення води в природі та житті людини. Державне агентство водних ресурсів України. 2021. <https://rovkrhm.gov.ua/znachenie-vody-v-prirode-i-zhizni-cheloveka-ee-poleznye-svoystva>.
2. Якісна питна вода – основа здоров'я людини. Preventive medicine. № 2 (108). 2014. С. 40–42.
3. Закон України «Про загальнодержавну програму «Питна вода України» на 2006-2020 роки»: від 3 березня 2005 року, № 2455-IV. 2009. <http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=2455-15>.
4. Маценко О. М., Чигрин О. Ю., Тарановський В. І., Долгодуш А. І. Соціо-еколого-економічні проблеми водопостачання в Україні. Механізм регулювання економіки. 2011. № 4. С. 264–271.
5. Гончарук В. В. Наука о воде. К.: Наук. думка, 2010.
6. Пічура В. І., Потравка Л. О. Екологічний стан басейну ріки Дніпро та удосконалення механізму організації природокористування на водозбірній території. Водні біоресурси та аквакультура. 2021. 1 (9). С. 170–200. <https://doi.org/10.32851/wba.2021.1.14>.
7. Артезіанська вода – найчистіша вода на планеті? 2021. <https://waterguide.com.ua/uk/artezianska-voda-najchystisha-voda-na-planeti/>.
8. Драгинский В. Л. Очистка подземных вод от соединений железа, марганца и органических загрязнений. Водоснабжение и сантехника. 1997. № 12. С. 16.
9. Долінський А. А. Принцип дискретно-імпульсного введення енергії та його використання в технологічних процесах. Вісн. АН УРСР. 1984. № 1. С. 39–46.
10. Долинский А. А. Использование принципа дискретно-импульсного ввода энергии для создания эффективных энергосберегающих технологий. ИФЖ. 1996. Т. 69, № 6. С. 35–43.
11. Пат. України № 114143. Долінський А. А., Ободович О. М., Резакова Т. А., Фіщенко А. М. Установка для аераційного знезалізнення підземних вод. Опубл. 27.02.2017, бюл. № 4.
12. Пат. України № 114144. Долінський А. А., Ободович О. М., Резакова Т. А., Фіщенко А. М. Спосіб аераційного знезалізнення підземних вод. Опубл. 27.02.2017, бюл. № 4.
13. Пат. України № 114382. Долінський А. А., Ободович О. М., Резакова Т. А., Фіщенко А. М. Спосіб окислювально-каталітичного очищення пластових і стічних вод. Опубл. 25.05.2017, бюл. № 10.
14. Долинский А. А., Ободович А. Н., Борхаленко Ю. А. Метод дискретно-импульсного ввода энергии и его реализация. Х.: Апостроф, 2012.

References

1. Znachennia vody v pryrodі ta zhytti liudyny. Derzhavne ahentstvo vodnykh resursiv Ukrainy. [The importance of water in nature and human life]. State Agency of Water Resources of Ukraine]. (2021). <https://rovkrhm.gov.ua/znachenie-vody-v-prirode-i-zhizni-cheloveka-ee-poleznye-svoystva>. [in Ukrainian].
2. Yakisna pytna voda – osnova zdorovia liudyny. [Water is the basis of human health, quality drinking water is the basis of human health]. (2014). Preventive medicine. № 2 (108). pp. 40–42. [in Ukrainian].
3. Zakon Ukrainy “Pro zahalnodержavnu prohramu “Pytna voda Ukrainy” na 2006-2020 roky”. [Law of Ukraine “On the nationwide program “Drinking water of Ukraine” for the years 2006-2020”]: dated March 3, 2005, № 2455-IV. (2009). <http://zakon.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi?nreg=2455-15>. [in Ukrainian].
4. Matsenko, O. M., Chigrin, O. Yu., Taranovsky, V. I., Dolgodush, A. I. (2011). Sotsio-ekoloho-ekonomichni problemy vodopostachannya v Ukrayini [Socio-ecological and economic problems of water supply in Ukraine]. Mechanism of Economic Regulation. № 4. pp. 264–271. [in Ukrainian].
5. Honcharuk, V. V. (2010). Nauka o vode [Water science]. Naukova dumka. [in russian].
6. Pichura, V. I., Potravka, L. O. (2021). Ekolohichnyy stan baseynu riky Dnipro ta udoskonalennya mekhanizmu orhanizatsiyi pryrodokorystuvannya na vodozbirniy terytoriyi [The ecological state of the Dnipro river basin and the improvement of the mechanism of nature management in the catchment area]. Water bioresources and aquaculture. 1 (9). pp. 170–200. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32851/wba.2021.1.14>.
7. Is artesian water the purest water on the planet? (2021). <https://waterguide.com.ua/uk/artezianska-voda-najchystisha-voda-na-planeti/>. [in Ukrainian].
8. Draginskiy, V. L. (1997). Ochistka podzemnykh vod ot soyedineniy zheleza, margantsa i organicheskikh zagryazneniy [Purification of groundwater from iron compounds, manganese and organic contaminants]. Water supply and plumbing. 12. P. 16. [in russian].
9. Dolinskiy, A. A. (1984). Pryntsyp dyskretno-impulsnoho vvedennia enerhii ta yoho vykorystannia v tekhnolohichnykh protsesakh [The principle of discrete-pulse energy input and its use in technological processes]. Visn. AN URSS. 1. P. 39-46. [in Ukrainian].
10. Dolinskiy, A. A. (1996). Yspolzovanye pryntsypa dyskretno-ympulsnoho vvoda enerhyy dlia sozdaniya effektivnykh enerhosberehaiushchykh tekhnolohiyi. [Using the principle of discrete-pulse energy input to create efficient energy-saving technologies]. IFJ. 69 (6). P. 35–43. [in russian].
11. Dolinskiy, A. A., Obodovych, O. M., Rezakova, T. A., Fishchenko, A. M. (2017). Ustanovka dlia aeratsiinoho znezaliznennia pidzemnykh vod. [Installation for aeration deironing of underground waters. Patent of Ukraine]. № 114143; published 27.02.2017, № 4. [in Ukrainian].
12. Dolinskiy, A. A., Obodovych, O. M., Rezakova, T. A., Fishchenko, A. M. (2017). Sposib aeratsiinoho znezaliznennia pidzemnykh vod. [Method of aeration deironing of underground waters. Patent of Ukraine]. № 114144; published 27.02.2017, № 4. [in Ukrainian].
13. Dolinskiy, A. A., Obodovych, O. M., Rezakova T. A., Fishchenko A. M. (2017). Sposib okysliuvalno-katalitychnoho ochyshchennia plastovykh i stichnykh vod. [Method of oxidative-catalytic treatment of formation and wastewater]. Patent of Ukraine. № 114382; published 25.05.2017, № 10. [in Ukrainian].
14. Dolinskiy, A. A., Obodovich, A. N., Borkhalenko, Yu.A. (2012). Metod diskretno-impulsnogo vvoda energii i yego realizatsiya [Discrete-pulse energy input method and its implementation]. Kharkiv: Apostrof. [in russian].