



**KAPITEL 3 / CHAPTER 3<sup>4</sup>**  
**APPLICATION OF DISCRETE-PULSE ENERGY INPUT FOR  
INTENSIFICATION OF PREPARATION OF DRINKING AND PROCESS  
WATER BY AERATION OXIDATION**

**DOI: 10.30890/2709-2313.2023-24-01-001**

## **Вступ**

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. Від її якості безпосередньо залежить здоров'я та життя людей [1]. 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. 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 [2].

### **3.1. Екологічні проблеми, пов'язані із забрудненням води**

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 [3]. Майже всі

---

<sup>4</sup>*Authors: Obodovych Oleksandr Mykolaiovych, Sydorenko Vitalii Volodymyrovych, Tselen Bohdan Yaroslavovych, Stepanova Olesya Evgeniivna, Rezakova Tetyana Anatoliyivna*



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) [4].

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].

Значну роль у деструкції 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. Хімічне та біологічне споживання кисню, вміст марганцю та заліза, а також кольоровість Дніпровської води значно перевищують нормативні значення, встановлені для господарсько-питного водоспоживання. У Дніпрі щорічно близько 10 тис. підприємств скидають понад 10 км<sup>3</sup> стічних вод, з яких 15 % є шкідливі води, тобто скинуті без будь-якої очистки. Тому через недбале ставлення до проблеми підготовки питної води, через велику кількість стічних вод низького ступеня очищення, які скидають підприємства, річка Дніпро опинилася на межі екологічної катастрофи.

Водні джерела артезіанського типу знаходяться на глибині 100-1000 м. Артезіанська вода може знаходитись під кількома водоносними шарами [5]. 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).

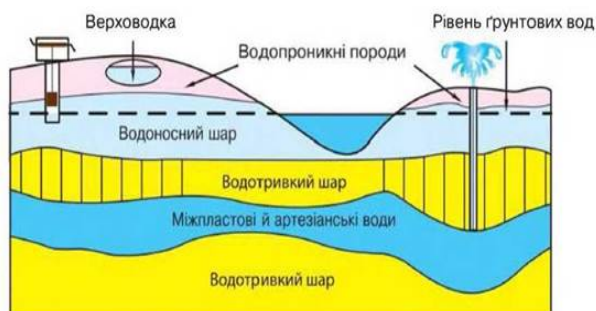


Рисунок 1 – Схема поширення підземних вод



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). 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 аерації знезалізнення води відносяться: 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). 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.

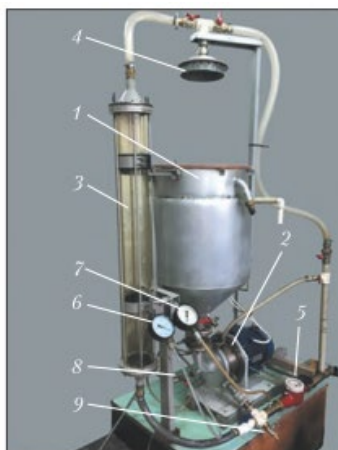
Мета досліджень – вдосконалення процесів очищення води від заліза, марганцю, сірководню, вуглекислого газу та інших речовин за рахунок використання методу дискретно-імпульсного введення енергії, що інтенсифікує процеси масо- і теплопереносу. В Інституті технічної теплофізики НАН України розроблено аераційно-окислювальну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

### **3.2. Аераційно-окислювальне обладнання для підготовки води**

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. 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 [6, 7]. Тому, на основі цього методу для вдосконалення процесів очищення води від заліза, марганцю, сірководню та інших речовин в Інституті технічної теплофізики НАН України розроблено роторну аераційно-окислювальну установку роторного типу (АОРТ) та дослідно-промислове обладнання (рис. 2, 3) [8].



**Рисунок 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.*



**Рисунок 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.*

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  $Fe(OH)_3$ . 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  $Fe(OH)_3$ , 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 знезалізування води відбувається прямоютоком 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 [9].

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.

### **3.3. Вплив конструктивних особливостей роторно-пульсаційної установки на ефективність знезалізування води**

В ході експерименту досліджено вплив конструктивних особливостей роторно-пульсаційної установки (РПУ) на ефективність знезалізування 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.

На рисунку 4 показано, що обробка води в аераторі-окислювачі може



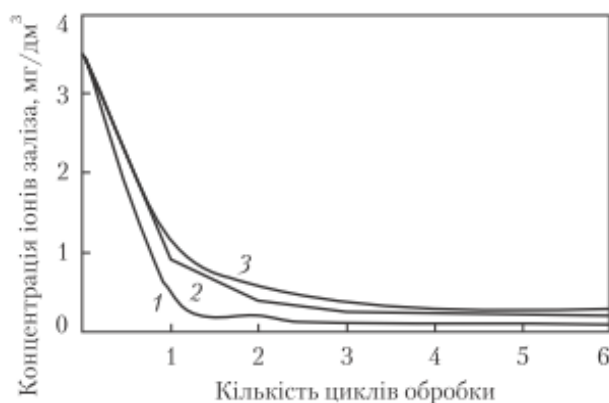
ефективно знизити концентрацію іонів заліза у воді. Так, при кутовій швидкості обертання ротора 55 об/с концентрація іонів заліза за один прохід води через робочі органи апарату (один цикл) зменшується з 3,5 до 0,25 мг/л. При зниженні кутової швидкості до 45 і 35 об/с необхідно збільшити кількість циклів 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 [10, 11].

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 пульсації (табл. 1). Початкова концентрація іонів заліза у воді становила 3,5 мг/л.

При аналізі даних таблиці 1 можна зробити висновок, що зміна частоти пульсації 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.



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

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		
	$30 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$	$40 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$	$50 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$
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  $50 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$  швидкість знезалізнення води зростає в 4 рази. Так, при витраті  $30 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$  для знезалізнення води від  $3,5$  до  $0,25$  мг/л необхідно 4 цикли обробки, а при  $50 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$  – 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 <sub>2</sub> S, мг/л	0,2	0,001	0,003	0,001
CO <sub>2</sub> , 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 [12].

Для оцінки ефективності установки визначено її енергетичні показники та проведено їх порівняльний аналіз. Найбільш близьким технічним рішенням до запропонованої установки є хвильовий гідродинамічний пристрій [13]. Для порівняння також використовувалося обладнання для технології хімічного окислення (табл. 4).

Таблиця 4 – Енергетичні показники роботи аераційно-окислювальних пристроїв

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

## Висновки

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. Подібних ефектів зазвичай неможливо досягти при використанні традиційних методів обробки дисперсних середовищ, навіть у разі значно





більшого рівня питомих енерговитрат.

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.