



**ДОЛІНСЬКИЙ  
Анатолій Андрійович** — академік НАН України, доктор технічних наук, професор, завідувач відділу тепломасообміну в дисперсних системах, почесний директор Інституту технічної теплофізики НАН України



**ОБОДОВИЧ  
Олександр Миколайович** — доктор технічних наук, головний науковий співробітник Інституту технічної теплофізики НАН України

## ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИ ПІДГОТОВЦІ ПИТНОЇ І ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ВОДИ

*У статті проаналізовано екологічні проблеми України, пов'язані із забрудненням р. Дніпро як основного джерела питного і технологічного водопостачання. 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, діоксиду вуглецю, фтору, наведено його енергетичні і технологічні показники та порівняльні характеристики запропонованої установки.*

**Ключові слова:** артезіанська вода, водоочищення, аератор-окиснювач, частота пульсацій, швидкість зсуву потоку.

Вода — це природне надбання людства, необхідна умова його життєдіяльності. Забезпечення населення якісною питною водою сприяє поліпшенню та збереженню здоров'я населення і посиленню безпеки нації в цілому.

За прогнозами ООН, до середини третього десятиліття XXI ст. більш як 4 млрд людей відчуватимуть нестачу води питної якості, що пов'язано як зі змінами клімату, так і з діяльністю людини. На сьогодні близько 90 % поверхневих і 30 % підземних вод, які забираються для потреб водопостачання, піддають додатковому очищенню [1].

Згідно з Указом Президента України «Про заходи щодо визначення і реалізації проектів з пріоритетних напрямів соціально-економічного та культурного розвитку» від 08.09.2010 № 895/2010 [2], визначено національний пріоритет «Нова якість життя», в рамках якого діє програма «Якісна вода», спрямована на забезпечення населення України якісною питною водою. Стратегічною метою цієї програми є досягнення європейських показників у дотриманні одного з основних прав людини — права на якісну питну воду.

Одночасно мають бути виконані завдання з оптимізації водопостачання всіх галузей промисловості, у яких технологічні

процеси потребують використання води лише питного призначення. Тому сьогодні актуальним є впровадження енергоощадного тепломагнітного обладнання для підготовки питної і технологічної води з метою більш ефективного вирішення екологічних проблем та проблем охорони навколишнього середовища.

Головним джерелом питного і технологічного водопостачання є поверхневі і підземні води. Для України основним поверхневим джерелом питної і технологічної води є річка Дніпро. Проте в останні 20 років через погану екологічну ситуацію та високий рівень забруднення вода Дніпра стає малоприсадною для питного водопостачання. Майже всі поверхневі джерела водопостачання України за рівнем забруднення наближаються до 3-го класу якості (розбавлені стічні води), а за міжнародною класифікацією — до 4-го класу (стічні води) [3].

У Дніпро щороку близько 10 тис. підприємств скидають понад 10 км<sup>3</sup> стічних вод, з яких 15% — це небезпечні води, тобто скидні води без будь-якого очищення. Вода річки забруднена отруйними хімічними речовинами: сполуками важких і радіоактивних металів, особливо після катастрофи на ЧАЕС, пестицидами. Через наявність великих водоймищ швидкість течії Дніпра зменшилася, що спричинює постійне «цвітіння» води внаслідок розмноження синьо-зелених водоростей, які виділяють токсичні речовини. Стан Дніпра було відображено в попередній Національній програмі екологічного оздоровлення басейну Дніпра та поліпшення якості питної води, в якій сказано, що «забруднення води в басейні Дніпра призвело до порушення природних процесів самоочищення водних об'єктів, що значно ускладнило проблему одержання якісної питної води на водогінних станціях», а, наприклад, «середньорічна концентрація забруднюючих речовин досягла в Каховському водосховищі: фенолів (канцерогени) — 1–2 ГДК, сполук міді — 6–11 ГДК, цинку — 7–12 ГДК».

І ще одна цитата з цієї Національної програми: «Як показали дослідження, стан водопровідних очисних споруд нині такий, що більшість хімічних сполук з води практично не

усуваються, особливо коли їх вміст перевищує гранично допустимі концентрації. Проблема загострюється тим, що існуючі технології підготовки питної води передбачають широке застосування хлору, зокрема для знешкодження продуктів розпаду фітопланктону, внаслідок чого в питній воді утворюється велика кількість токсичних канцерогенних сполук, що мають кумулятивну дію. Неякісна вода є однією з причин того, що в останні роки в Україні спостерігається зростання рівня таких захворювань, як виразкова хвороба шлунка, жовчнокам'яна хвороба, хвороби органів дихання тощо».

Отже, через недбале ставлення до цієї водної артерії державного значення, через велику кількість стічних вод низького рівня очистки, які скидають підприємства промислового та аграрного комплексів, Дніпро перебуває на грані екологічної катастрофи [4].

На думку директора Інституту колоїдної хімії та хімії води ім. А.В. Думанського НАН України академіка НАН України В.В. Гончарука, найбільш надійно захищеним від антропогенного впливу джерелом питного водопостачання є артезіанські підземні води [3]. Підземні води менш схильні до сезонних коливань, краще захищені від небезпеки забруднення і зараження, більш рівномірно поширені на території, на відміну від поверхневих вод. Підземні води — складні багатокомпонентні системи, які містять цілий комплекс неорганічних і органічних речовин, газів, мікрофлори. Від умов їх формування залежить концентрація мінеральних солей у цих водах.

Однак, незважаючи на те, що підземні води, на відміну від поверхневих, характеризуються загалом вищою якістю, вона може не відповідати нормативним вимогам за вмістом окремих елементів. Застосування таких вод для питних цілей без попереднього очищення неможливе.

На території України найбільшими артезіанськими басейнами є Волинсько-Подільський, Дніпровсько-Донецький, Причорноморський. Глибина залягання артезіанських вод в Україні зростає з півночі (100–200 м) на південь (500–600 м). Артезіанська вода знаходиться

в глибинних шарах землі і зазвичай виходить на поверхню під тиском. Її запаси зосереджені в межах западин, флексур або інших геологічних структур, утворюючи артезіанські басейни (рис. 1).

Артезіанські води утворилися в дуже давні часи внаслідок геологічного руху земної кори. Вони не мають нічого спільного з ґрунтовими водами, крім того, що залягають у товщі землі. Проте артезіанські води мають певні переваги над поверхневими і ґрунтовими водами, оскільки розміщені між двома водонепроникними шарами, а тому захищені від потрапляння в них органічних забруднень. На склад артезіанських вод не впливають хімічні добрива та стічні води підприємств. Ці води не беруть участі в обміні з поверхнею Землі.

Якість артезіанської води залежить від складу пластів земної кори і часу її залягання між ними. Серед недоліків цього типу вод слід відзначити те, що контакт з підземними мінералами збагачує їх різними солями, мікро- та макроелементами в концентраціях, що зазвичай перевищують гранично допустимі (ГДК). Найчастіше в артезіанській воді міститься велика кількість заліза, марганцю, сірководню, вуглекислого газу, фтору. Для очищення від цих сполук зазвичай використовують аераційно-окисні методи з подальшою фільтрацією.

До основних аераційних методів знезалізнення води належать такі:

- «спрощена аерація» з подальшим фільтруванням крізь зернистий наповнювач;
- «глибока аерація» з подальшим фільтруванням;
- метод «Віредокс».

Метод спрощеної аерації ґрунтується на здатності води, що містить залізо (II) і розчинений кисень, при фільтруванні крізь зернистий шар (пісок, антрацит, керамічну крихту) виділяти залізо на поверхні зерен, утворюючи каталітичну плівку з гідроксидів дво- і тривалентного заліза. Ця плівка значно інтенсифікує процеси окиснення і виділення заліза з води [5].

Для збагачення води киснем застосовують різні способи, наприклад вилив води з висоти

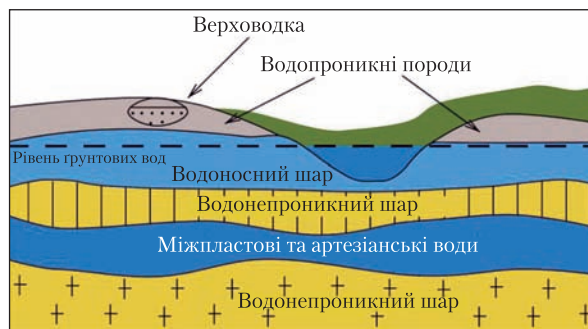


Рис. 1. Схема поширення підземних вод

0,5 м в карман фільтра зі швидкістю 2,5–3 м/с. За стехіометричним співвідношенням на окиснення 1 мг заліза (II) витрачається 0,143 мг кисню. В установках знезалізнення для забезпечення досить високої швидкості хімічної реакції, відповідно до оптимальних параметрів фільтрувального завантаження, вміст кисню, розчиненого у воді, має становити 0,5–0,9 мг на 1 мг заліза (II). В разі, якщо потрібно одночасно збагатити воду киснем і видалити частину вільного діоксиду вуглецю, раціонально застосовувати градірні. Як декарбонізатори градірні широко використовують на ТЕЦ [6].

У багатьох випадках для збагачення води повітрям раціональним виявляється застосування водоповітряного ежектора. Тиск (напір) на манометрі до ежектора — 320 кПа (3,2 атм), після ежектора — 80 кПа (0,8 атм). Продуктивність ежектора за повітрям — 7,2 м<sup>3</sup>/год. Витрати води 27 м<sup>3</sup>/год. Зі зростанням опору у фільтрувальному завантаженні і збільшенням протитиску після ежектора його продуктивність знижується [7].

При окисненні заліза (II) киснем у природній воді відбуваються такі фізико-хімічні процеси:

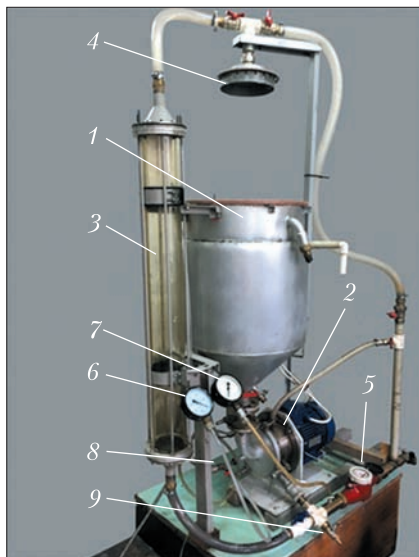
1) перенесення кисню крізь примезовий газовий дифузний шар до межі фаз вода—повітря;

2) перенесення кисню крізь примезовий шар води від межі фаз вода—повітря;

3) дифузія кисню в об'ємі води;

4) гомогенна реакція окиснення;

5) гідроліз тривалентного заліза.



**Рис. 2.** Аераційно-окиснювальна установка роторного типу (АОРТ): 1 – збірник-накопичувач; 2 – аератор-окиснювач; 3 – фільтраційно-окиснювальна колона; 4 – розпилювальна головка; 5 – лічильник води; 6 – манометр; 7 – вакуумметр; 8 – кран подачі повітря; 9 – двоходовий кран

Знезалізнення води — процес масообміну, ускладнений хімічними реакціями. Швидкість хімічного перетворення визначається швидкістю транспорту речовини і теплоти до зони реакції та швидкістю реакції. Процеси масо-і теплообміну, які супроводжуються хімічною реакцією, можуть відбуватися в дифузійній, кінетичній або проміжній областях. У дифузійній області процес лімітується швидкістю транспорту теплоти і речовини в зоні реакції і реалізується за великих швидкостей хімічної реакції. Навпаки, процес, що відбувається в кінетичній області, лімітується швидкістю хімічної реакції і реалізується за великих швидкостей транспорту теплоти і речовини до зони реакції.

Отже, процес знезалізнення води залежить від швидкості реакції окиснення заліза (II) киснем повітря у водному розчині. Процес окиснення заліза (II) киснем повітря, у свою чергу, залежить від швидкості масопереносу (розчинення і доставки кисню) в дифузійній області. Дискретно-імпульсне введення енер-

гії інтенсифікує процеси масо- і теплопереносу [8, 9].

Для поліпшення процесів очищення води від заліза, марганцю, сірководню, діоксиду вуглецю та інших речовин в Інституті технічної теплофізики НАН України розроблено аераційно-окиснювальну установку роторного типу (АОРТ) (рис. 2) [10].

Очищення води за розробленою схемою здійснюється так. Артезіанська вода, що надходить на очистку, подається в збірник-накопичувач (1). Після відкриття двоходового крана вода потрапляє в аератор-окиснювач (2). Подача повітря в приймальний патрубок апарата здійснюється відкриттям крана (8). Отже, до аератора-окиснювача роторного типу надходить водно-повітряна суміш, в якій відбувається розчинення кисню, а також частково реакції окиснення  $Fe^{2+}$  до  $Fe^{3+}$  і гідролізу до  $Fe(OH)_3$ . Після цього водно-повітряна суміш прямує до фільтраційно-окиснювальної колони (3), яка може бути заповнена піском або вугіллям різних фракцій (велика знизу, дрібна згори). У колоні відбуваються процеси остаточного окиснення, гідролізу і очищення води від  $Fe(OH)_3$ , що випав в осад. Після колони очищена від заліза вода проходить крізь розпилювальну головку для видалення діоксиду вуглецю. Знезалізнена вода з нижньої частини посудини (1) через двоходовий кран (9) надходить до збірника очищеної води і далі йде на реалізацію.

Слід зазначити, що знезалізнення води відбувається в прямотоці за один прохід крізь аератор-окиснювач роторного типу, фільтраційно-окиснювальну колону і розширювальну посудину. Для вищого ступеня очищення води від заліза установка може працювати в режимі рециркуляції [11].

Установку АОРТ було апробовано у промислових умовах на Червонослобідському спиртовому заводі концерну «Укрспирт». Для технологічних цілей на підприємстві використовують воду з артезіанських свердловин глибиною 200–250 м. За своїми фізико-хімічними показниками ця вода не відповідає вимогам ДСТУ на питну воду. Вміст заліза у досліджу-

ваній воді досягав 3,5 мг/л, тоді як ГДК становить 0,3 мг/л. Для знезалізнення води на заводі було використано аераційно-окиснювальну установку роторного типу.

Під час проведення експерименту було досліджено вплив конструктивних особливостей роторно-пульсаційного вузла (РПВ) на ефективність знезалізнення води. Одним із показників, які впливають на гідродинамічну обстановку всередині аератора-окиснювача, є кутлова швидкість обертання ротора. В експерименті кутову швидкість ротора змінювали від 35 до 55 об/с. Початкова концентрація іонів заліза в об'єкті дослідження становила 3,5 мг/л. Графік залежності концентрації іонів заліза у воді від кількості циклів обробки за різних швидкостей обертання ротора наведено на рис. 3.

З рис. 3 видно, що обробка води в аераторі-окиснювачі дозволяє ефективно зменшувати концентрацію іонів заліза у воді. Так, за кутової швидкості обертання ротора 55 об/с концентрація іонів заліза за один прохід води через робочі органи апарата (один цикл) знижується з 3,5 до 0,25 мг/л. Зі зменшенням кутової швидкості до 45 та 35 об/с для досягнення бажаного результату ( $\leq 0,3$  мг/л) необхідно збільшувати кількість циклів обробки.

Ротор в аераторі-окиснювачі зроблено у вигляді циліндра з поперечними щілинними отворами розміром 20,0×30,0 мм. Їх кількість становить 60. Статор аналогічно ротору має таку саму кількість отворів. Зазор між статором і ротором — 350 мкм [12, 13].

З огляду на конструктивні особливості статора і ротора, воду в установці можна обробляти з різною частотою пульсацій. Частота пульсацій визначається множенням кутової швидкості обертання ротора на кількість отворів у роторі. На наступному етапі досліджень було встановлено залежність концентрації заліза від кількості циклів обробки з різною частотою пульсацій (табл. 1). Початкова концентрація іонів заліза у воді так само становила 3,5 мг/л.

Аналізуючи дані табл. 1, можна дійти висновку, що зміна частоти пульсацій потоку впливає на вміст у ньому іонів заліза. В разі обробки



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

**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

води з частотою пульсацій 3 кГц концентрація іонів Fe за один цикл зменшується від 3,5 до 0,2 мг/л. Зі зниженням частоти пульсацій до 2,5 кГц значення ГДК (0,3 мг/л) можна досягти за 2 цикли обробки. Подальше зменшення частоти пульсацій до 2,0 кГц бажаного результату не дає.

Ще одним критерієм оцінювання інтенсивності обробки води в аераторі-окиснювачі є швидкість зсуву потоку. Цей показник поєднує дві величини: швидкість руху потоку в радіальному напрямку і величину зазора між статором і ротором. Динаміку зміни концентрації іонів заліза у воді залежно від кількості циклів обробки за різної швидкості зсуву потоку показано в табл. 2.

Дані, наведені в табл. 2, свідчать що зі збільшенням швидкості зсуву потоку від 30

до  $50 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$  швидкість знезалізнення води збільшується в 4 рази. Так, за швидкості зсуву потоку  $30 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$  для знезалізнення води від 3,5 до 0,25 мг/л необхідні 4 цикли обробки, а за швидкості зсуву потоку  $50 \cdot 10^3 \text{ c}^{-1}$  — один.

Доведено, що, керуючи гідродинамічними параметрами та змінюючи конструкційні осо-

**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

**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

**Таблиця 4. Енергетичні показники роботи аераційно-окиснювальних пристроїв**

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

бливості РПВ аератора-окиснювача, можна регулювати динаміку і якість очищення артезіанських вод від сполук заліза.

У табл. 3 наведено результати експериментів з очищення артезіанської води від заліза, марганцю, сірководню, вуглекислого газу. Воду брали зі свердловини глибиною 250 м, що знаходиться в Київській області. Очищення проводили на установці АОРТ в один цикл за швидкості обертання РПВ 55 об/с і частоти пульсації 3 кГц.

З табл. 3 видно, що за цих режимів обробки вміст зазначених речовин після очистки не перевищує ГДК, встановлені як в Україні, так і в країнах ЄС. Спосіб окиснювально-каталітичного очищення пластових і стічних вод захищено патентом України [14].

Для оцінки ефективності роботи установок було визначено її енергетичні показники і проведено їх порівняльний аналіз. Найбільш близьким до запропонованої установки технічним рішенням є хвильовий гідродинамічний пристрій [15]. Для порівняння брали також обладнання технології хімічного окиснення. Порівняльні показники роботи зазначених пристроїв наведено в табл. 4.

Дані таблиці переконливо доводять, що застосування АОРТ для очищення води порівняно з вищезгаданими пристроями дає змогу знизити енерговитрати в 15–20 разів. Такий технологічний та енергетичний ефект очищення води в аераційно-окиснювальній установці роторного типу пояснюється тим, що вона працює за методом дискретно-імпульсного введення енергії. Робота АОРТ полягає в тому, що водоповітряна суміш, проходячи крізь щілинні отвори та зазори РПВ аератора-окиснювача, зазнає дії ударних хвиль, міжфазної турбулентності, мікрокавітації, кумулятивних струменів, вихорів, які спричиняють на міжфазних поверхнях нестійкості Релея–Тейлора або Кельвіна–Гельмгольца, що приводить до інтенсивного дроблення бульбашок повітря, значного збільшення сумарної поверхні контакту фаз та інтенсифікації процесів масо- і теплопереносу. Подібних ефектів зазвичай не вдається досягти при використанні традицій-

них методів обробки дисперсних середовищ навіть у разі значно більшого рівня питомих енерговитрат.

Проведені дослідження дозволяють дійти висновку, що застосування нового теплома-

сообмінного обладнання у вигляді аераційно-окиснювальної установки роторного типу дає можливість інтенсифікувати процес підготовки питної і технологічної води та в кілька разів знизити енерговитрати.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Крушенко Г.Г., Сабирова Д.Р., Петров С.А., Талдыкин Ю.А. Проблема воды. *Вода и экология. Проблемы и решения*. 2000. № 3. С. 28.
2. <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/1256-2010-%D0%BF>
3. Гончарук В.В. *Наука о воде*. К.: Наук. думка, 2010.
4. Мягченко О.П. *Основы экологии*. Підручник. К.: Центр учбової літератури, 2010.
5. Драгинский В.Л. Очистка подземных вод от соединений железа, марганца и органических загрязнений. *Водоснабжение и сантехника*. 1997. № 12. С. 16.
6. Копылов А.С., Ловыгин В.М., Очков В.Ф. *Водоподготовка в энергетике*: уч. пособ. для вузов. М.: Изд. дом МЭИ, 2006.
7. Золотова Е.Ф., Асс Г.Ю. *Очистка воды от железа, марганца, фтора и сероводорода*. М.: Стройиздат, 1975.
8. Долінський А.А. Принцип дискретно-імпульсного введення енергії та його використання в технологічних процесах. *Вісн. АН УРСР*. 1984. № 1. С. 39–46.
9. Долінський А.А. Использование принципа дискретно-импульсного ввода энергии для создания эффективных энергосберегающих технологий. *ИФЖ*. 1996. Т. 69, № 6. С. 35–43.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. Промтов М.А. *Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика*. М.: Машиностроение-1, 2001.
14. Долинский А.А., Ободович А.Н., Борхаленко Ю.А. *Метод дискретно-импульсного ввода энергии и его реализация*. Х.: Апостроф, 2012.
15. Курбатов А.Ю. Интенсификация процесса очистки воды от железа с применением волновых гидродинамических устройств: дис. ... канд. техн. наук. 02.00.04. М., 2014.

Стаття надійшла 09.01.2018.

A.A. Dolinskiy, A.N. Obodovich

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv)

## ENVIRONMENTAL PROBLEMS AND ENERGY SAVING OF DRINKING AND TECHNOLOGICAL WATER TREATMENT

The article analyzes the environmental problems of Ukraine related to the pollution of the river Dnipro as the main source of drinking and technological water supply. The necessity of increasing the use of groundwater for the above-stated purposes is substantiated. The existing methods and equipment for water treatments are described. The new technological heat-mass-transfer equipment for the intensification of purification of artesian water from iron, manganese, hydrogen sulfide, carbon dioxide, fluoride is presented. The energy and process indicators and comparative characteristics of this equipment are presented.

**Keywords:** artesian water, water treatment, aerator-oxidizer, frequency of pulsations, shear rate of flow.