

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ТА ГІДРОДИНАМІЧНИХ  
ПАРАМЕТРІВ АЕРАЦІЙНО-ОКИСНЮВАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ РОТОРНОГО  
ТИПУ НА ПРОЦЕС ЗНЕЗАЛІЗНЕННЯ ПИТНОЇ ВОДИ**

**Ободович О. М. д. т. н., Сидоренко В. В., к. т. н.**

**Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України**

**RESEARCHES OF INFLUENCE OF DESIGN FEATURES AND  
HYDRODYNAMIC PARAMETERS OF AERATION-OXIDIZING UNIT OF  
ROTARY TYPE ON IRON REMOVAL FROM DRINKING WATER**

**Obodovych O. M., Sydorenko V. V.**

**Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine**

Copyright © 2017 by author and the journal "Scientific Works".

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**Анотація.** В даний час для питного водопостачання використовується все більше води з артезіанських свердловин (підземні води). Це пов'язане з погіршенням екологічної обстановки в Україні, яка призвела до зараження поверхневих вод важкими металами, радіоактивними елементами, нітратами, нітридами і т. ін. На більшості підприємств харчової промисловості для технологічного водозабезпечення також використовуються підземні води. Одним з основних недоліків підземних вод є підвищений вміст в них заліза. Зважаючи на це, важливою задачею в процесі водопідготовки залишається пошук, розробка та впровадження ефективних та енергоощадних способів знезалізнання підземних вод питного призначення. В статті наведені результати досліджень по обробці артезіанської води в аераційно-окиснювальній установці роторного типу з метою знезалізнання. Представлена схема та принцип роботи установки.

Установка реалізує процес знезалізнання води окисненням двовалентного заліза киснем повітря, що подається в установку через ежектора рахунок ефекту Вентурі. Основним елементом представленої установки є аератор-окиснювач, що складається з роторно-пульсаційного вузла та крильчатки відцентрового насоса. Роторно-пульсаційний вузол складається з двох роторів, що з'єднані в один роторний вузол, та статору, що виконані у вигляді обичайок із поперечними щілинними отворами прямокутного перерізу. Між роторами та статором передбачений зазор. Аератор-окиснювач є апаратом, що реалізує принцип дискретно-імпульсного введення енергії, який передбачає обробку середовища шляхом введення енергії у вигляді коротких, потужних імпульсів. В системах рідина-рідина, газ-рідина введення енергії таким чином призводить до комплексу тепломасообмінних та гідродинамічних ефектів впливу на середовище. В процесі аерації це призводить до інтенсивного дроблення бульбашок повітря, значно-му збільшенню сумарної поверхні контакту фаз, інтенсивному перемішуванню.

В роботі експериментально визначено вплив конструктивних параметрів аератора-окиснювача на швидкість знезалізнання. Одним з таких параметрів є швидкість обертання роторного вузла. Зміна швидкості обертання при сталих значеннях кількості перерізів та товщині міжциліндрового зазору призводить як до зміни частоти пульсацій потоку в каналах роторів та статору, так і до зміни характеру течії водно-повітряної суміші в міжциліндрових зазорах. Збільшення швидкості обертання роторного вузла призводить також до збільшення кількості повітря, що подається на аерацію.

**Abstract.** Currently, for drinking water supply the more water from artesian wells (ground water) is used. This is caused by the deterioration of ecological situation in Ukraine, which led to the contamination of surface water with heavy metals, radioactive elements, nitrates, nitrites, and so on. Most of the food industry for process water supply also uses groundwater. One of the major drawbacks of groundwater is the high content of iron. Therefore, an important task in the process of water treatment is the search, development and implementation of effective and energy efficient iron removal methods from groundwater for drinking purposes. The article presents results of research on the treatment of artesian water in aeration-oxidizing unit of rotor type for the purpose of iron removal. The scheme and the principle of the unit are presented. The unit realizes an iron removal from water by oxidation of ferrous by air oxygen supplied to the system through ejector by the "Venturi" effect. The main element of unit is aerator-oxidizer, consisting of rotary pulsation unit and impeller of centrifugal pump. Rotary pulsation unit consists of two rotors assembled to one element and stator the form of hollow cylin-

*ders with transverse slotted holes of rectangular section. Between rotors and stator gaps are provided. Aerator-oxidizer is a device that realizes the principle of discrete pulse energy input, which involves media treatment by energy input in the form of short, powerful pulses. In systems liquid-liquid, gas-liquid energy input thus leading to complex heat and mass transfer and hydrodynamic effects upon the media. During aeration, this leads to intensive fragmentation of air bubbles, a significant increase in the total phase contact surface area, intensive mixing.*

*In the paper experimentally the influence of design parameters of aerator-oxidizer for iron removal rate is determined. One such parameter is a rotation speed of the rotary unit. Change of rotation speed at constant number of sections and thickness of gap between rotor and stator leads to a change of frequency pulsations of flow in the channels of rotor and stator, and to change the character of the flow of water-air mixture in the gaps between rotors and stator. Increased rotation speed of the rotary unit also leads to increase the amount of air supplied to the aeration.*

**Ключові слова:** знезалізнєння, аерація, дискретно-імпульсне введення енергії, аератор-окиснювач.

**Key words:** iron removal, aeration, discrete pulse energy input, aerator-oxidizer.

**Вступ.** В даний час для питного водопостачання використовується все більше води з артезіанських свердловин (підземні води) [1]. Це пов'язане з погіршенням екологічної обстановки в Україні, яка призвела до зараження поверхневих вод важкими металами, радіоактивними елементами, нітратами, нітритами і т. ін. На більшості підприємств харчової промисловості для технологічного водозабезпечення також використовуються підземні води. Одним з основних недоліків підземних вод є підвищений вміст в них заліза [2]. Зазвичай вміст заліза в артезіанських водах складає від 1 до 5 мг/л. При вмісті заліза більш ніж 1 мг/л вода набуває бурого кольору, “залізний” присмак. Сполуки заліза та залізобактерії відкладаються у водопроводах та зменшують їх пропускний перетин [3]. За стандартом на питну воду, вміст заліза не повинен перевищувати 0,3 мг/л. Для багатьох галузей промисловості, наприклад, виробництва натурального та віскозного шовку, напівпровідників, лікєро-горілочних виробів, граничний вміст заліза не повинен перевищувати 0,05 мг/л.

Для знезалізнєння води використовують різноманітні методи. Дослідження проводяться в декількох основних напрямках, серед яких слід відзначити мембранні, сорбційні, біологічні. Проте аерація залишається найбільш поширеним [4]. Ефективність інших методів зростає за умови інтенсивної аерації [5]. Ефективність аераційного очищення води від заліза залежить від гідравлічних та масообмінних характеристик аеруючого пристрою.

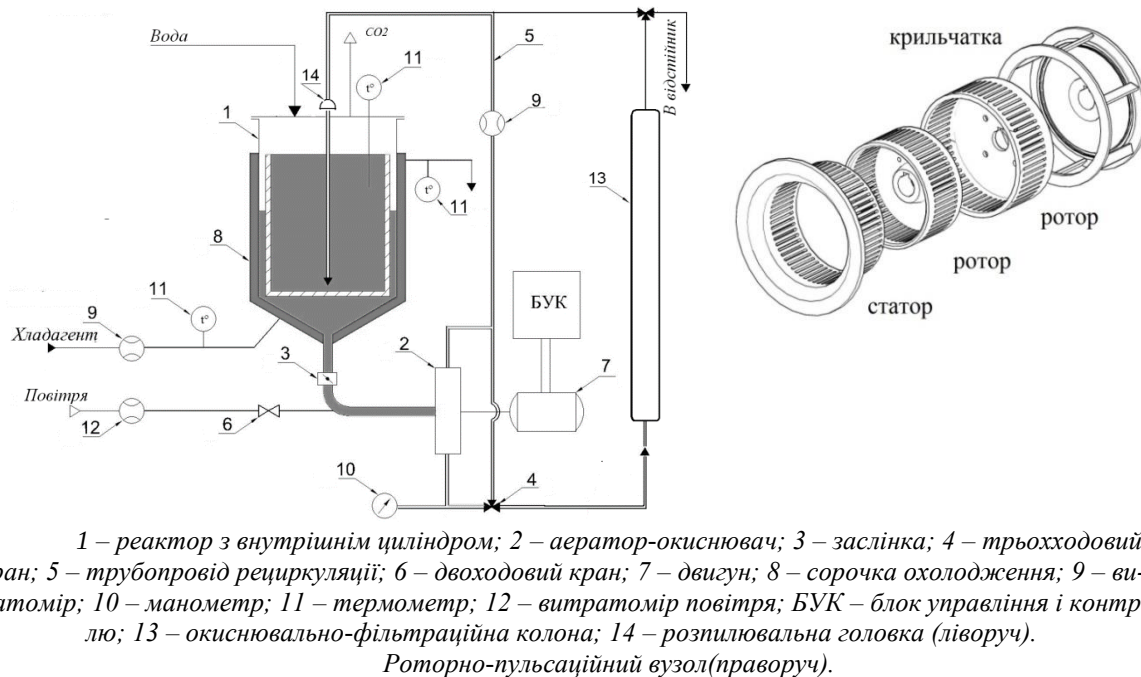
**Аналіз проблеми та огляд літературних даних.** Рішення загальної задачі інтенсифікації технологічних процесів зводиться до впливу на систему зовнішніх фізичних факторів, що дозволяють змінити в потрібному напрямку стан системи та швидкість протікання в ній процесу тепло-та масопереносу. Завдання перетворення енергії, що вводиться в гетерогенну систему типу «тверде тіло-рідина», «рідина-рідина», «газ-рідина» і «тверде тіло-рідина-газ», яке забезпечує не тільки ефективну її трансформацію, а й активацію внутрішніх джерел енергії в самому середовищі, вирішується методом дискретно – імпульсного введення енергії (ДІВЕ). Механізми ДІВЕ були теоретично досліджені в роботі [6], а технологічні та інженерні аспекти цього принципу представлені в [7] і узагальнені в [8]. Принцип методу полягає в перетворенні енергії (теплової, механічної, електричної, електромагнітної і ін.), що вводиться в середовище, в короткі імпульси, дискретно розподілені у всьому робочому об'ємі. Із загальної кількості апаратів, що реалізують метод ДІВЕ слід виділити роторно – дискові і роторно – пульсаційні апарати (РПА), близькі за принципом дії, але мають певні відмінності.

Для циліндричного апарату характерні, як правило, щільні канали прямокутного перетину, в дисковому апараті, поряд з прямокутними доцільно застосування канали круглого перетину, причому довжина каналів може істотно відрізнитися між собою. На відміну від циліндричних РПА насосний ефект в апаратах дискового типу відсутній і переміщення рідини відбувається тільки за рахунок прикладеного зовнішнього перепаду тиску. Доцільність застосування методу ДІВЕ для інтенсифікації технологічних процесів, пов'язаних з масообмінними процесами, викладена в значній кількості робіт, що розглядають процеси перемішування, гомогенізації, диспергування, емульгування, екстракції, розчинення і ін.

**Мета дослідження.** Метою даної роботи є дослідження впливу конструктивних та гідродинамічних параметрів аераційно-окиснювальної установки роторного типу на процес знезалізнєння підземних вод питного призначення.

**Матеріали та методи.** Об'єктом дослідження слугувала вода з артезіанських свердловин з вмістом заліза від 1 до 10 мг/л. Установка (рис. 1) складається з наступних блоків: реактора, аератора-окиснювача, контуру рециркуляції, контуру циркуляції холодоагенту, блоку управління і контролю, вимірювальної апаратури, окиснювально-фільтраційної колони. Реактор є резервуаром з внутрішнім діаметром циліндричної частини 0,42 м, висотою 0,48 м, нижньої конічної частини з висотою 0,2 м, верхнім діаметром 0,42 і нижнім – 0,05 м, корисним об'ємом 60 л і служить для проведення процесу обробки рі-

дини. З метою підтримки постійної температури процесу, в реакторі передбачена сорочка охолодження (нагрівання), що містить вхідний і вихідний патрубки для під'єднання до водопровідної мережі. Нагрівання води в сорочці здійснювалося через водонагрівач проточний Thermix Stream 350 White. Для визначення рівня заповнення реактора служить винесений рівнемір. У середині реактора може бути передбачений знімний внутрішній циліндр, призначений для прийому оброблюваної рідини з системи рециркуляції.



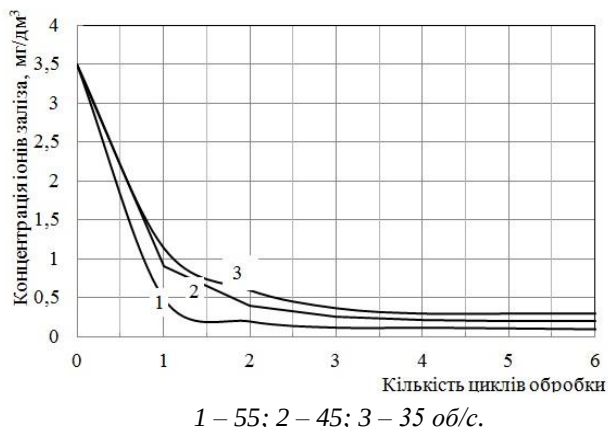
**Рис. 1.** Апаратурно – технологічна схема експериментальної аераційно-окиснювальної установки.

У верхню частину реактора уварений патрубок для під'єднання рециркуляційного трубопроводу. У кришці реактора передбачені технологічні патрубки для введення в робочий об'єм рідини. Кришка оснащена оглядовим люком. Матеріалом корпусу реактора служить сталь марки 12Х18Н10Т. Матеріал ущільнень – харчова гума. У донній частині реактора передбачена заслінка для зміни величини об'ємної витрати. Аератором-окиснювачем є роторно-пульсаційний апарат, призначений для трансформації методом ДІВЕ електричної енергії, що підводиться, в фізичні, гідродинамічні, акустичні впливи на рідину. Аератор-окиснювач в повній збірці включає в себе встановлені на валу диск з лопатками – робоче колесо відцентрового насоса та роторно-пульсаційний вузол, що складається з двох роторів та статора, виконаних у вигляді обичайок із поперечними щілинними отворами розміром 40,0х3,0 мм, кількістю 60, які розташовані в корпусі. Зазор між статором і ротором складає 150 мкм. Робочий об'єм аератора-окиснювача – 0,0015 м<sup>3</sup>.

Блок управління і контролю призначений для управління, контролю і регулювання роботи електрообладнання. Блок складається з магнітного пускача, перетворювача частоти, амперметра, лічильника електроенергії. Окиснювально-фільтраційною колоною є скляна труба діаметром 260 і висотою 1500 мм. У нижньому і верхньому торцях труби встановлена нержавіюча сітка (Ø 500 мкм). Колона заповнена кулями пінополістеролу (Ø 1000 мкм) і призначена для окиснення і видалення заліза, марганцю, сірководню, які містяться у воді. Дослідно-промислова установка працює наступним чином. У реакторі через патрубок подається рідина. Потім включають аератор-окиснювач, відкривають заслінку 3 і триходовий кран 4, який знаходиться в положенні, при якому рідина циркулює через трубопровід рециркуляції 5 по контуру реактор – аератор-окиснювач – реактор. Під час рециркуляції суміші відкривають двоходовий кран, через який за рахунок розрідження, створеного у всмоктуючому трубопроводі, надходить повітря з атмосфери. Таким чином, рідина насичується повітрям. Отримана суміш направляється в робочу камеру аератора-окиснювача, де піддається обробці методом ДІВЕ. Після аератора-окиснювача суміш диспергованих в рідині бульбашок повітря (газова емульсія) надходить в трубопровід і поступає в нижню частину окиснювально-фільтраційної колони. Проходячи через шар пінополістеролу, рідина виходить з колони і подається до збірника готової продукції. У разі недостатнього очищення рідина може циркулювати по замкненому контуру: реактор – аератор-окиснювач – окиснювально-фільтраційна колона – реактор кіль-

ка разів, а потім подаватися до збірнику готової продукції. При рециркуляції, рідина надходить назад в реактор, проходячи через розпилювальну головку.

**Результати та обговорення.** Одним з показників, які впливають на гідродинамічну обстановку все-



1 – 55; 2 – 45; 3 – 35 об/с.  
**Рис. 2. Залежність зміни концентрації іонів заліза в воді від кількості циклів обробки при різних швидкостях обертання роторно-пульсаційного вузла.**

редині аератора-окиснювача є кутова швидкість обертання ротора. При проведенні експерименту кутову швидкість ротора міняли з 35 до 55 об/с. Початкова концентрація іонів заліза в об'єкті дослідження складала 3,5 мг/л. Графік зміни концентрації іонів заліза в воді від кількості циклів обробки при різних швидкостях обертання ротора представлений на рис.2.

З рис. 2 видно, що обробка води в аераторі-окиснювачі дозволяє ефективно знижувати концентрацію іонів заліза у воді. Так, при кутовій 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 від 45 та 35 об/с необхідно збільшувати кількість циклів обробки для досягнення бажаного результату (не більше 0,3 мг/л).

**Висновки.** Аераційно-окиснювальну установку роторного типу можна ефективно використовувати для очищення води від іонів заліза, керуючи гідродинамічними параметрами та змінюючи конструкційні особливості роторно-пульсаційного вузла аератора-окиснювача можна регулювати динаміку і якість очищення артезіанських вод від сполук заліза.

Швидке знезалізнєння пояснюється тим, що вода, збагачена киснем повітря в процесі очищення потрапляє в робочі органи апарата (ротор-статор-ротор). Водно-повітряна суміш проходить скрізь щілинні отвори та зазори роторно-пульсаційного вузла піддається дії ударних хвиль, міжфазної турбулентності, мікрокавітації, кумулятивних струменів, вихорів, котрі викликають на міжфазних поверхнях нестійкості Релея-Тейлора або Кельвіна-Гельмгольца, що призводить до інтенсивного дроблення бульбашок повітря, значному збільшенню сумарної поверхні контакту фаз і підвищенню процесів масо- і теплопереносу. Подібні ефекти, зазвичай, недосяжні при використанні традиційних методів при обробці дисперсних середовищ навіть при значно більшому рівні питомих енерговитрат.

#### Література

1. Драгинский, В. Л. Очистка подземных вод от соединений железа, марганца и органических загрязнений // Водоснабжение и сантехника. 1997. № 12. С. 16-18.
2. Кирюхин, В. А. Общая гидрогеология. СПб.: Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет), 2008. 439 с.
3. McNeill L.S., Edwards M. Iron pipe corrosion in distribution system // Journal – American Water Works Association. 2001. Vol. 93, № 7. P. 88-100.
4. Водоподготовка: Справочник / Под ред. д.т.н., действительного члена Академии промышленной экологии С.Е. Беликова. М.: Аква-Терм, 2007. 240 с.
5. Munter R., Ojaste H., Sutt J. Complexed Iron Removal from Groundwater // Journal of Environmental Engineering. 2005. Vol.131. P. 1014-1020.
6. Долинский А.А., Иваницкий Г.К. Принципы разработки новых энерго-ресурсо-сберегающих технологий и оборудования на основе методов дискретно-импульсного ввода энергии // Промышленная теплотехника. 1997. Т. 19, № 4-5. С. 13-25.
7. Долинский, А. А. Использование принципа дискретно-импульсного ввода энергии для создания эффективных энергосберегающих технологий // Инженерно-физический журнал. 1996. Т. 69, № 6. С. 35-43.
8. Накорчевский А.И., Басок Б.И., Рыжкова Т.С. Гидродинамика роторно-пульсационных аппаратов // Инженерно-физический журнал. 2002. Т. 75, № 2. С. 58-68.

#### References

1. Draginskiy, V. L. (1997). Ochistka podzemnyih vod ot soedineniy zheleza, margantsa i organicheskikh zagryazneniy. Vodosnabzhenie i santehnika, 12, 16-18.
2. Kiryuhin, V. A. (2008). Obschaya gidrogeologiya. Sankt-Peterburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvenniy gorniy institut (tehnicheskiy universitet).

3. McNeill, L.S., Edwards M. (2001). Iron pipe corrosion in distribution system. Journal – American Water Works Association, 93 (7), 88–100.
4. Belikov S.E. and al. (2007). Vodopodgotovka: Spravochnik. Moskwa: Akva-Term.
5. Munter, R., Ojaste, H., Sutt, J. (2005). Complexed Iron Removal from Groundwater. Journal of Environmental Engineering, 131, 1014–1020.
6. Dolinskiy, A. A., Ivanitskiy G. K. (1997). Printsipy razrabotki novyih energo-resurso-sberegayuschih tehnologiy I oborudovaniya na osnove metodov diskretno-impulsnogo vvoda energii. Promyshlennaya tep-lotekhnika, 19(4-5), 13-25.
7. Dolinskiy, A. A. (1996). Ispolzovanie printsipa diskretno-impulsnogo vvoda energii dlya sozdaniya effektivnyih energosberegayuschih tehnologiy. Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal, 69 (6), 35-43.
8. Nakorchevskiy, A. I., Basok, B. I., Ryzhkova, T. S. (2002). Gidrodinamika rotorno-pulsatsionnyih apparatov. Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal, 75(2), 58–68.

УДК: 628.16.045.5–047.58:628.165

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ВОДЫ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ ПОЛЕ

Тришин Ф.А к.т.н, Трач А.Р. магистр, Орловская Ю. В. аспирант  
Одесская национальная академия пищевых технологий

## ENHANCEMENT OF THE ENERGY EFFICIENCY OF THE CRYSTALIZATION OF THE WATER IN THE ULTRASONIC FIELD

Trishin F. A., Ph.D., Trach A.R. master's degree, Orlovskaya Yu.V. post-graduate student  
Odessa National Academy of Food Technologies

Copyright © 2017 by author and the journal “Scientific Works”.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



**Аннотация.** Исследование процесса теплопередачи в реальных условиях сопряжено с большими трудностями, вследствие сложности и нестационарности процессов, поэтому важность приобретает теоретический анализ и построение моделей. Было проведено численное моделирование влияния пористости на процесс кристаллизации, установлено, что пористость блока льда является значительным фактором, влияющим на формирование двухфазного слоя. Приведены энергетические и конструктивные преимущества вымораживающих установок блочного типа. Подтверждено превосходство блочного вымораживания с применением ультразвука над другими методами очистки воды.

**Abstract.** In the world, 5000 km<sup>3</sup> of fresh water are used every year. This amounts to 11% of the annual runoff of all rivers in the world. More than half of the world's future population will have been affected by severe water shortages by 2050. Such prospects significantly increase the importance of water purification. There is a growing interest in the technologies of block freezing for water cleaning. Systems of this type are characterized by simplicity of design, compactness, and energy efficiency. Due to its principle, block freezing eliminates systemic losses of cold. Since the efficiency of the process directly depends on the quality of its management, there arises a problem of controlling the processes of heat transfer with directional crystallization. In the real world, it is hard to conduct researches of heat transfer process due to its complexity and nonstationarity. That is why theoretical analysis and theoretical models are critically needed. In an ideal thermophysical conditions, the directional crystallization process must take place when the substrate is grown with zero porosity. Any methods of intensification can lead to an increase of the rate of freezing, however it will be accompanied by a porous structure formation. During the crystallization process, temperature, concentration, and porosity of each layer of the substrate are changed, so it is problematic to find an analytic solution to the problem. During the current study, the numerical model of the heat transfer process was obtained. It was found that the porosity of the ice structure has a significant effect on the processes of heat and mass transfer. It was decided to study the process of freezing in the ultrasonic field. The experiments were carried out using an ultrasonic generator. It was found that the optimum temperature is observed when ultrasound has the frequency of 20 kHz. At the higher frequency, the water temperature rises. By solving the equations of material balance, a formula for determining the porosity of the ice block was obtained. Thus, the optimization task is to find the regimes and methods with which the nec-