

## ЗНЕЗАРАЖЕННЯ ВОДИ ОЗОНОМ: СТАРІ ПРОБЛЕМИ І НОВА ГІПОТЕЗА

Яковлев І.О.

Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління  
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ  
yigor858@gmail.com

Дослідження окреслює проблеми забруднення водних ресурсів України, висвітлює методи знезараження води, серед яких озонування є одним з найбільш ефективних, хоча й має певні недоліки. Загальновідомо, що якість води – важливий фактор для забезпечення благополуччя людини та належного навколишнього середовища. Чиста вода необхідна для підтримки життя, здоров'я та добробуту людей. Однак сучасні методи очищення води часто не здатні повною мірою видалити всі забруднюючі речовини та мікроорганізми, які можуть бути присутніми у воді. З огляду на це існує велика потреба в розробленні нових ефективніших методів очищення води. Один з них – озонування води для знищення мікроорганізмів та інших забруднювачів. Традиційні технології озонування стикаються з проблемами, зокрема, це низька розчинність озону, утворення токсичних побічних продуктів та високі енергетичні витрати. У зв'язку з цим, виникає необхідність використання нових технологічних рішень. Запропонований новий метод озонування, заснований на принципі «не озон у воду, а воду в озон», має потенціал значно підвищити ефективність знезараження, зменшити витрати на енергію та знизити ризик утворення небезпечних відходів. Такий підхід дозволяє повторне використання стічних вод, що є актуальним завданням для багатьох країн, у тому числі і для України. Дослідження засвідчує – новий метод, що використовує озоновий реактор зворотно-зустрічної дії, забезпечує глибоке очищення води від забруднень. Результати випробувань показали його високу ефективність у порівнянні з традиційними методами. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на оптимізацію технології та її впровадження в муніципальні системи водопостачання та обробки стічних вод, що має значний соціальний та екологічний ефект. Новий метод озонування може допомогти ефективно очистити стічні води, зменшити забруднення води та поліпшити стан навколишнього середовища.

*Ключові слова:* забруднення води, знезараження, озонування, екологічно чисті технології, озоновий реактор.

### **Ozone disinfection of water: old problems and a new hypothesis. Yakovlev I.**

It is widely acknowledged that water quality plays a pivotal role in safeguarding human and environmental well-being. Clean water is a vital necessity for the sustenance of human life, health, and well-being. However, the current suite of water treatment methods is frequently unable to completely remove all contaminants and microorganisms that may be present in water. In this regard, there is a significant need for the development of new, effective methods of water purification. One such method is water ozonation, which is employed to destroy microorganisms and other pollutants. This article presents a study of the issue of water pollution, with a particular focus on the efficacy of water disinfection methods, including ozonation, which is regarded as one of the most effective, but which also has certain drawbacks. Conventional ozonation techniques encounter challenges such as low ozone solubility, the generation of toxic by-products, and elevated energy expenditures. In light of these considerations, the development of novel technological solutions is imperative. The proposed new method of ozonation, based on the principle of “not ozone to water, but water to ozone,” has the potential to significantly enhance the efficiency of disinfection, reduce energy costs, and mitigate the risk of hazardous waste generation. This approach may also facilitate the reuse of wastewater, which is an urgent task for many countries, including Ukraine. The study validates the efficacy of the novel method, which employs a reverse-action ozone reactor, in achieving comprehensive water purification from contaminants. The test outcomes substantiate its superior performance in comparison to conventional techniques. Further investigation could be directed towards the optimization of the technology and its integration into municipal water supply and wastewater treatment systems, which would have a substantial social and environmental impact. The innovative ozonation approach can facilitate the effective treatment of wastewater, reduce water pollution, and enhance the environment. *Key words:* water pollution, disinfection, ozonation, environmentally friendly technologies, ozone reactor.

**Постановка проблеми.** Проблема знезараження води є актуальною та глобальною проблемою, особливо в умовах зростання населення, промислового розвитку, урбанізації та воєнних дій. Одним із визнаних ефективних методів знезараження води є озонування, яке, попри свою ефективність, має низку суттєвих недоліків, які потребують усунення для підвищення якості води.

Ефективність озону як окислювача і дезінфікуючого засобу стала поштовхом до впровадження його в водоочищення вже більш ніж століття. Останнім часом озонування викликало інтерес до інших застосувань, включаючи очищення стічних вод,

де озон використовується для зменшення мікрозабруднювачів. Як і у випадку з іншими окислювачами, утворення побічних продуктів дезінфекції під час озонування неминуче. Побічними продуктами дезінфекції, що утворюються в процесі озонування, можуть бути альдегіди, кетони, карбонові кислоти, нітрозаміни та бромат. Залежно від водної матриці та якості, склад побічних продуктів може змінюватися. В свою чергу, в залежності від цілей очищення та властивостей води, можуть застосовуватися різні стратегії пом'якшення наслідків, щоб перешкодити утворенню критичних побічних продуктів.

Всебічне механістичне розуміння реакцій озонування має вирішальне значення для точного прогнозування шляхів реакції та ідентифікації продуктів окислення. Нинішній брак таких знань обмежує потенціал для оптимізації процесу озонування і зменшення його неефективності, що підкреслює необхідність нових досліджень і розробок.

**Актуальність дослідження.** Зростаюча потреба у використанні екологічно чистих методів знезараження води зумовлює необхідність подальшого вдосконалення існуючих технологій. Озонування води є перспективним методом, проте потребує нових підходів для подолання наявних труднощів.

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.** Це дослідження спрямоване на вирішення важливої наукової та практичної проблеми, пов'язаної із удосконаленням методів знезараження води. Запропонований новий метод озонування має потенціал для значного покращення процесу знезараження, забезпечуючи високу ефективність при зменшенні негативних побічних ефектів.

Запропонований авторами новий метод озонування безпосередньо пов'язаний з вирішенням важливої науково-практичної проблеми в галузі водопідготовки. Традиційні методи озонування мають суттєві недоліки, такі як низька розчинність озону у воді, утворення токсичних побічних продуктів, високі енерговитрати та вартість обладнання. Ці проблеми обмежують їх ефективність і безпеку в масштабах, необхідних для забезпечення якості води.

Пропонований метод, заснований на принципі «озон до води, а не вода до озону» є інноваційним до процесу обробки води озоном. Застосування даного методу підвищує ефективність дезінфекції, зменшує витрати енергії та знижує ризик утворення небезпечних відходів. Якщо цей метод буде впроваджено на практиці, це стане важливим кроком вперед у розвитку екологічно чистих технологій, які відповідають сучасним вимогам охорони навколишнього середовища.

Крім того, новий метод допоможе вирішити проблему повторного використання стічних вод, що є актуальним питанням у багатьох країнах світу, в тому числі і в Україні. Це, в свою чергу, зменшить забруднення поверхневих вод та забезпечить сталість водопостачання.

Таким чином, дослідження автора не тільки відповідає на існуючі виклики в галузі водопідготовки, але й відкриває нові перспективи для досліджень і практичних застосувань, що мають значний соціальний та екологічний вплив.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останні дослідження свідчать, що впровадження озону у сферу водопідготовки можна віднести до перших десятиліть 20-го століття. Тим не менш, застосування хлорування у водопідготовці залишалося домінуючим підходом протягом декількох десяти-

тиліть 20-го століття. Одним з основних факторів, що сприяють використанню хлору для очищення води, є його здатність утворювати досить тривалий залишковий дезінфікуючий засіб, який перешкоджає розмноженню мікробів у воді. Однак, виявлення галогенованих побічних продуктів дезінфекції в хлорованій воді та подальші дослідження їхньої токсичності викликали занепокоєння щодо ризиків для здоров'я, пов'язаних із впливом хлорування. Це призвело до підвищення інтересу до дезінфікуючих засобів, в тому числі озону, як альтернативи хлору [1].

Дослідження Soham Joshi та Anita Kumari підтверджують ефективність озонування, як методу знезараження стічних вод, оскільки озон ефективніше, ніж хлор, знищує віруси та бактерії. Крім того, процес озонування вимагає короткого контактного часу (приблизно від 10 до 30 хвилин), озон швидко розкладається, відсутні шкідливі залишки. Також після озонування не відбувається відростання мікроорганізмів за винятком тих, які захищені частинками в потоці стічних вод. Крім того, озон виробляється на місці, і, таким чином, існує менше проблем безпеки, пов'язаних із транспортуванням і обробкою [2].

Підтверджуючи високу ефективність озону у знищенні вірусів, бактерій та інших патогенних організмів роботи Іванько О.М. та інших авторів підкреслюють, що озонування є одним з найбільш ефективних методів, здатних забезпечити глибоке очищення води [3].

Дослідження щодо оцінки результативності використання озону для очищення води для знищення мікроорганізмів та інших забруднювачів у воді виконали такі автори як М. Martinelli та ін. Вони провели серію експериментальних досліджень для оцінки антимікробного впливу озонування на воду у боротьбі із такими мікроорганізмами як *E. coli*, *S. aureus*, *P. aeruginosa*, *S. faecalis* і *Legionella pneumophila* (*L. pneumophila*). Результати цих досліджень свідчать про ефективність очищення води за допомогою озонування. Зокрема, після 20 хвилин обробки озоном було зафіксоване значне скорочення *S. aureus* і *S. faecalis*. *L. pneumophila*. Озон мав меншу дію на *P. aeruginosa* та, на *E. coli*, хоча останній мікроорганізм вважається одним із найбільш чутливих до озону бактерій. Проте досягнута ефективність очищення за цим методом залежить від концентрації та тривалості контакту з озоном [4].

Озон стає популярним дезінфікуючим засобом для питної води, як через його доведену ефективність у знищенні мікробів, так і через те, що він не залишає похідних і будь-яких залишків [5].

Dan Niu та ін. у своїй роботі відзначають, що процес озонування є ефективним для дезінфекції питної води, окислення органічних речовин разом із мікробами та видалення запаху та кольору при обробці води. Інші переваги озону в обробці води включають покращення коагуляції, відстоювання

та фільтрації. Одним із висновків є те, що в процесі озонування передозування не є економічним, а також може призвести до небажаних проблем зі здоров'ям через високий рівень побічних продуктів дезінфекції. Тоді як недостатнє дозування не може гарантувати видалення з'єднань водної матриці і, таким чином, проводити ненадійну дезінфекцію [6].

Розчинність озону у воді набагато вища, ніж розчинність кисню, що свідчить про те, що його можна надійно застосовувати для очищення води та стічних вод [7]. Оскільки інтерес до повторного використання води та екологічного захисту водних шляхів зростає, озонування все частіше включається в передові процеси очищення стічних вод для окислення мікробруднівачів озonom і гідроксильними радикалами. Однак, під час озонування вод, що містять бром, окислення бромідів озonom призводить до утворення броматів, що є проблемою для здоров'я людини та довкілля [8].

Els Schuman та ін. також вважають, що озонування є однією з придатних технологій для видалення мікробруднівачів зі стічних вод. Однак, окрім значного покращення якості води після озонування, також можуть утворюватися продукти окислення, деякі з яких можуть мати потенційно негативний вплив на якість поверхневих вод або на джерела питної води [9].

Аналіз останніх публікацій свідчить про високу ефективність озону для очищення води, що робить його переважним методом порівняно з традиційним хлоруванням. Незважаючи на численні переваги, процес озонування супроводжується ризиками утворення небезпечних побічних продуктів окислення, що може негативно впливати на якість води. В умовах зростаючого інтересу до повторного використання води та охорони водних ресурсів, озонування набуває значення як ефективна технологія для видалення мікробруднівачів зі стічних вод. Однак, необхідно враховувати потенційні ризики, пов'язані з окисленням бромідів, що може призводити до утворення броматів.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Аналіз наявного практичного досвіду знезараження стічних вод показує, що в даний час інтенсивно розробляються екологічно безпечні методи знезараження стічних вод як альтернатива хлорному знезараженню. Водночас, технології та обладнання, які використовують для знезараження стічних вод, не завжди забезпечують необхідний ступінь її очищення та знезараження і мають побічні наслідки для навколишнього середовища.

Це підкреслює важливість подальших досліджень у цій галузі, спрямованих на вдосконалення існуючих технологій та розробку нових, більш ефективних і безпечних методів очищення.

**Новизна.** Пропонується робоча гіпотеза у якій автор припускає, що зміна способу озонування води, зі способу «озон у воду» на спосіб «воду в озон»,

позбавить технологію знезараження води «принципових труднощів» [3], які властиві технології барботування води озonom.

Новий метод подачі дрібно диспергованої води у порожнину реактора, з високою концентрацією озону і подальше проходження води через повітряно-озонове середовище [10] дозволяє отримати на виході очищену воду, у якій відсутні недоліки та «принципові труднощі» [3] традиційного методу озонування води барботуванням.

**Методологічне або загальнонаукове значення.** Дослідження є важливим з методологічної точки зору, оскільки представляє новий підхід до озонування води. Цей підхід може послужити основою для подальших наукових і прикладних досліджень у галузі екологічно чистих технологій очищення води.

**Викладення основного матеріалу.** На сьогодні, в системах знезараження стічних вод у більшості випадків застосовують озонування способом барботування, що є доволі технічно складним і для його реалізації необхідне виконання ряду послідовних технологічних операцій, таких як: очищення повітря, його охолодження та сушіння, змішування озono-повітряної суміші з водою, шляхом подачі озону у сміть з водою, яка обробляється, відведення та деструкція залишкової озono-повітряної суміші, виведення їх у атмосферу. Крім того, необхідно багато допоміжних процесів та устаткування [3]. Що значно здорощує даний метод знезараження стічних вод через потребу великогабаритного і дороговартісного обладнання, матеріалів і сервісного обслуговування.

Натомість, прикладом реалізації нового методу, у якому відсутні допоміжні процеси і великогабаритне устаткування, що працює саме у новий спосіб [10], є установка знезараження води на базі озонного реактора зворотно-зустрічної дії (ОРЗЗД) [10].

Установка (ОРЗЗД) містить насос подачі брудної води (1), блок форсунок (2), генератор озону (3), озонний реактор зворотно-зустрічної дії (4) вода, яка підлягає очищенню, подається насосом (1) до блоку форсунок (2) і розпилюється вертикально у порожнині реактора (4). У свою чергу у порожнину реактора (4), від генератора озону (3), примусово, вертикально вниз, назустріч водно-озонній суміші подається озono-повітряна суміш, за рахунок чого досягається процес інтенсивної зворотно-зустрічної циркуляції дрібно диспергованої водно-озонової та озono-повітряної сумішей (рис. 1).

Важливо, що новий метод озонування дозволяє обробити (пропустити через реактор) на порядок більшу кількість води, при менших енергетичних затратах.

Більш того, знезараження води відбувається у проточному режимі і не потребує великогабаритного і дороговартісного обладнання – багатокубових ємностей, так само, як і деструкторів для утилізації

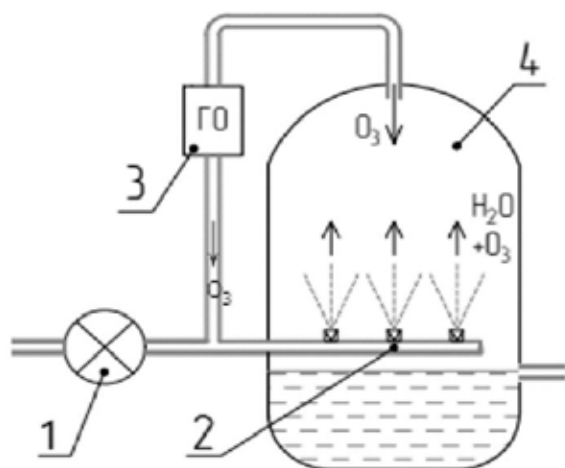


Рис. 1. Схема озонного реактора зворотньо-зустрічної дії (ОРЗЗД)

надлишкового озону, а також, приборів контролю озону у повітрі.

У рамках проведених мікробіологічних і хіміко-аналітичних випробувань нового методу, на стічних водах закритого плавального басейну, виявлена його здатність здійснювати глибоке очищення води від зважених часток, розчинених сполук хлору, органічних сполук, практично повністю вдалося усунути кольоровість, мутність води і сторонні запахи.

Також, підтвердилися припущення автора, що у процесі обробки води новим методом не утворюються токсичні і канцерогенні речовини, у очищеній воді відсутній залишковий озон, рН води знаходився у межах 7,5 одиниць.

Вартий уваги і той факт, що у приміщенні басейну концентрація озону у повітрі відповідало нормам ГДК, без додаткового застосування деструкторів озону.

Згідно протоколів випробувань ДП «Київського обласного центру контролю та профілактики хвороб МОЗ», які здійснювалися протягом 12 місяців, вода, очищена через озонний реактор (ОРЗЗД), у чаші плавального басейну повністю відповідала санітарним вимогам ДСанПіН.

Створення нового інноваційного обладнання, а саме озонного реактора зворотньо-зустрічної дії (ОРЗЗД) зокрема дозволило на практиці перевірити теоретичні припущення висунуті у робочій гіпотезі: новий метод озонування, а саме проходження дрібно диспергованої води через повітрянно-озонову суміш у ємності реактора, дозволяє отримати кращі показники знезараження води і усунути проблеми (недоліки) традиційного методу барботування води озonom.

**Висновки.** Проведенні науково-практичні дослідження і отриманні результати дозволяють автору висунути робочу гіпотезу: новий метод озонування, а саме проходження диспергованої води через повітрянно-озонову суміш у ємності реактора, дозволяє отримати кращі показники знезараження води і усунути проблеми (принципові труднощі [3]) традиційного методу барботування води озonom.

Науково-практичні дослідження підтвердили ефективність нового методу озонування, який дозволяє досягти кращих показників знезараження води у порівнянні з традиційним методом барботування. Новий підхід дозволяє усунути основні недоліки існуючих технологій і забезпечує гарантований антимікробний бар'єр.

Запропонований метод озонування має потенціал для широкого впровадження у системах водопостачання та обробки стічних вод. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на оптимізацію технології та розширення її застосування для різних типів води.

### Література

1. Manasfi T. Ozonation in drinking water treatment: an overview of general and practical aspects, mechanisms, kinetics, and byproduct formation. *Comprehensive Analytical Chemistry. Elsevier*. 2021. № 92. P. 85-116. <https://doi.org/10.1016/bs.coac.2021.02.003>.
2. Joshi S., Kumari A. Ozonation and its Application in Wastewater Treatment. *International Journal For Multidisciplinary Research*. 2023. № 5. <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2023.v05i06.8814>
3. Іванько О.М., Бабієнко В.В., Кримець Г.В. Знезараження стічних вод – сучасний погляд на проблему. *Актуальні проблеми транспортної медицини*. 2013. № 2(32). С. 54-63.
4. Martinelli M., Giovannangeli F., Rotunno S., Trombetta C.M., Montomoli E. Water and air ozone treatment as an alternative sanitizing technology. *J Prev Med Hyg*. 2017. № 58(1):E48-E52. PMID: 28515631; PMCID: PMC5432778.
5. Remondino M., Valdenassi L. Different Uses of Ozone: Environmental and Corporate Sustainability. Literature Review and Case Study. *Sustainability*. 2018. № 10(12):4783. <https://doi.org/10.3390/su10124783>.
6. Niu D., Wang X., Chen X., Ding L., Yang J., Jiang F. Optimized dosage control of the ozonation process in drinking water treatment. *Measurement and Control*. 2021. № 54(5-6):692-700. <https://doi.org/10.1177/00202940211007164>.
7. Wei Chaohai, Zhang Fengzhen, Hu Yun, Feng Chunhua Wu Haizhen. Ozonation in water treatment: the generation, basic properties of ozone and its practical application. *Chemical Engineering*. № 33(1). 2017. P. 49-89. <https://doi.org/10.1515/revce-2016-0008>.
8. Morrison C. M., Hogard S., Pearce R., Mohan A., Dickenson E.R.V., Urs von Gunten, Wert E. C. Critical Review on Bromate Formation during Ozonation and Control Options for Its Minimization. *Environmental Science & Technology*. 2023. № 57 (47), 18393-18409. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c00538>.
9. Schuman E., Bisschops I., Riedijk X., Wilt A. Literature study on oxidation products. 2022. URL: <http://surl.li/aeFuoh/> (дата звернення 13.11.2024).
10. Спосіб очищення та знезараження води озонуванням: пат. 155164 Україна: МПК6 C02F1/78, № u202302714; заявл. 05.06.23; опубл. 24.01.24, Бюл. № 4/2024.