

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-32>

УДК 628.16:504.064.36:519.876.5

БОНДАРЧУК ОЛЕКСАНДР

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0002-6816-0532>

e-mail: Bondarchukau@gmail.com

СПАСЬОНОВА ЛАРИСА

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0002-7562-7241>

e-mail: lar_spas@yahoo.com

ШАХНОВСЬКИЙ АРКАДІЙ

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0003-2963-4026>

e-mail: amshakhn@kpi.ua

КВІТКА ОЛЕКСАНДР

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

<https://orcid.org/0000-0003-4034-7052>

e-mail: kafedra.ahv@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ДІОКСИДОМ ХЛОРУ: 1. ПЛАНУВАННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

У статті досліджено застосування діоксиду хлору як альтернативного дезінфікуючого агента у системах централізованого водопостачання України з урахуванням сучасних викликів, зумовлених руйнуванням інфраструктури та погіршенням якості природних вод під час воєнних дій. Проаналізовано недоліки традиційних технологій знезараження води, які домінують на більшості вітчизняних водоканалів. Діоксид хлору розглянуто як перспективний реагент, що забезпечує високу ефективність знезараження в широкому діапазоні рН, знижене утворення хлорорганічних сполук, здатність руйнувати біоплівки та стабільність залишкової концентрації у водорозподільчій мережі. Для визначення оптимальних умов дозування реагенту, що забезпечували б мінімізацію утворення побічних продуктів, застосовано підхід на основі математичного й комп'ютерного моделювання процесів водоочищення.

Запропоновано класифікацію моделей, застосовуваних в практиці дослідження технологічних систем очищення води. Проведено активний багатофакторний експеримент за центральним композиційним рототабельним планом, у якому як фактори розглядалися рН, температура води, доза реагенту, тривалість контакту та вміст органічних речовин.

Виконано структурну ідентифікацію математичних моделей – визначення найбільш адекватного типу та формальної структури моделі, а також складу змінних, параметрів та функціональних залежностей, які забезпечують коректне відтворення поведінки досліджуваного об'єкта.

Результати дослідження можуть слугувати основою для модернізації систем водопідготовки та впровадження адаптивного дозування діоксиду хлору на водоканалах України.

Ключові слова: очищення природної води, знезараження, діоксид хлору, хлорити, моніторинг, планування експерименту.

BONDARCHUK OLEKSANDR, SPASONOVA LARYSA, SHAKHNOVSKY ARCADY, KVITKA OLEKSANDR

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

INVESTIGATION OF WATER TREATMENT PROCESSES USING CHLORINE DIOXIDE: 1. EXPERIMENTAL DESIGN

The article addresses the use of chlorine dioxide as an alternative disinfectant in centralized water supply systems in Ukraine, taking into account contemporary challenges arising from infrastructure damage and the deterioration of natural water quality during military operations. The drawbacks of traditional water disinfection technologies, which prevail at most Ukrainian water utilities, are analyzed. Chlorine dioxide is considered a promising reagent that provides high disinfection efficiency across a wide pH range, reduced formation of chlorinated organic by-products, the ability to destroy biofilms, and stable residual concentrations within the distribution network.

To determine the optimal dosing conditions that would minimize the formation of disinfection by-products, an approach based on mathematical and computer modelling of water treatment processes was applied. A classification of models used in the study of technological water treatment systems is proposed.

An active multifactor experiment was conducted according to a central composite rotatable design, in which pH, water temperature, reagent dose, contact time, and the content of organic matter were considered as factors.

Structural identification of the mathematical models was performed, including the determination of the most adequate model type and formal structure, as well as the selection of variables, parameters, and functional relationships that ensure the correct representation of the behavior of the investigated system.

The results of the study can serve as a basis for the modernization of water treatment systems and for the implementation of adaptive chlorine dioxide dosing at water utilities in Ukraine.

Keywords: natural water treatment, disinfection, chlorine dioxide, chlorites, monitoring, design of experiments

Стаття надійшла до редакції / Received 18.01.2026

Прийнята до друку / Accepted 11.02.2026

Опубліковано / Published 26.03.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Бондарчук Олександр, Спасьонова Лариса, Шахновський Аркадій, Квітка Олександр

Постановка проблеми

Система водопостачання та водовідведення України зазнає колосального навантаження та руйнувань внаслідок повномасштабної воєнної агресії РФ. Пошкодження критичної водної інфраструктури, неконтрольовані скиди та зростання ризиків хімічного та біологічного забруднення поверхневих і підземних вод створюють безпрецедентну загрозу для санітарно-епідеміологічної безпеки населення. У цих умовах проблема ефективної та безпечної водопідготовки набуває стратегічного значення.

Мета дослідження – аналіз особливостей, переваг та викликів застосування діоксиду хлору на українських станціях водопідготовки в умовах воєнних дій; оцінка можливостей розрахунку доз дезінфектанту, оптимальних в сенсі утворення побічних продуктів дезінфекції.

Нижче представлено результати першої частини досліджень, присвяченої питанням структурної ідентифікації (вибору типу) математичних моделей та планування експерименту. Продовження дослідження – проблеми параметричної ідентифікації математичних моделей та прийняття інженерно-технологічних рішень за результатами моделювання, – буде представлено в наступній публікації.

Аналіз досліджень та публікацій

Значна кількість українських станцій водопідготовки функціонують за класичною схемою: коагуляція, відстоювання, фільтрація та хлорування. Дезінфекція здійснюється переважно газоподібним хлором, який подається із сталевих контейнерів або балонів через дозатори, або гіпохлоритом натрію. Ці технології були відпрацьовані ще в радянський період і залишаються базовими через відносну простоту та належну підготовку персоналу. Однак така технологічна інерція має й негативні наслідки. При взаємодії хлору з природними органічними речовинами у воді утворюються небажані побічні продукти – хлороформ, тригалогенметани (ТГМ), галогеноцтові кислоти (ГОК) тощо. Транспортування, зберігання і дозування газоподібного хлору вимагає суворого дотримання правил безпеки, що є складним у воєнний час. З початком активних бойових дій в Україні логістика постачання реагентів зазнала серйозних ускладнень. Виявилася критична залежність електролізного гіпохлориту натрію, який часто розглядається як безпечніша альтернатива газоподібному хлору, від енергопостачання. До того ж, розчини гіпохлориту характеризуються обмеженою стабільністю внаслідок поступового розкладання під час зберігання; їх ефективність суттєво змінюється при коливаннях температури та якості вихідної води.

Також в Україні використовується хлор-амонізація як альтернатива класичному хлоруванню, як один із надійних методів пролонгованої дії в мережі, та як спосіб зменшення тригалогенметанів та галогеноцтових кислот. Недоліками цього метода є низька окиснювальна і знезаражувальна дії, можливість утворення токсичних і канцерогенних галоацетонітрилів, техногенна небезпека у зв'язку із застосуванням токсичних газів (аміаку, хлору), неможливість застосування як самостійного методу, особливо в разі перманентних потенційних ризиків забруднення, у тому числі залпового, води в джерелах водопостачання.

Через руйнування інфраструктури відбувається погіршення якості вихідної річкової води: зростає каламутність, кольоровість, концентрація органічних речовин та мікробне забруднення.

Дедалі більшої уваги набуває використання діоксиду хлору як альтернативного дезінфектанту, тому що він є сильним окисником, який здатен ефективно інактивувати бактерії, віруси, спори, цисти найпростіших, а також руйнувати біоплівки на внутрішніх поверхнях трубопроводів [1].

До переваг діоксиду хлору в якості окисника в системах водоочищення також належать його висока ефективність у широкому діапазоні рН (5-10), низька доза для досягнення необхідного ступеня знезараження, стабільна залишкова концентрація в розподільній мережі (що сприяє запобіганню вторинного забруднення трубопроводів), відсутність запаху і присмаку у воді. На відміну від хлору, ClO_2 в процесі знезараження води не утворює канцерогенних тригалометанів [2].

У цих умовах окремі вітчизняні водоканали почали впроваджувати технологію дезінфекції на основі діоксиду хлору [3-5]. Пілотні установки або генератори ClO_2 у багатьох випадках використовуються як резервні чи в складі комбінованих систем залежно від ситуації. Початкові результати виявилися обнадійливими, що полягало у зменшенні утворення побічних продуктів, покращенні органолептичних властивостей води та забезпеченні її відповідності нормативним вимогам за санітарно-мікробіологічними показниками якості. Під час експлуатації генераторів ClO_2 , крім стабільності залишкової концентрації окисника в системі водорозподілу на значній відстані від станції очищення, також спостерігалось зниження концентрацій побічних продуктів дезінфекції (тригалометанів, галогеноцтових кислот); покращення санітарно-мікробіологічних показників; зменшення корозійної активності води та осадоутворення в трубопроводах.

Відомою особливістю застосування діоксиду хлору є побічні продукти окиснення [1, 5-7]. Відповідно до ДСанПіН 2.2.4-171-10 [8], у питній воді контролюють залишкову концентрацію ClO_2 та хлоритів як побічних продуктів окиснення, при чому гранично допустима концентрація хлоритів встановлювалася на рівні $0,2 \text{ мг/дм}^3$. За вимогами ВООЗ [9] та Директиви ЄС 2020/2184 [10] норматив для хлоритів і хлоратів складає $0,7 \text{ мг/дм}^3$ (для систем очищення з використанням діоксиду хлору), що було імплементовано у новому ДСанПіН «воєнного часу» на питну воду [11].

Виклад основного матеріалу

Вибір типу математичних моделей. Важливим інструментом досліджень при впровадженні на водопровідних станціях нових реагентів або/та процесів знезараження води є комп'ютерне моделювання. На основі цифрових двійників технологічних процесів – інтегрованих моделей, які описують сукупність процесів,

що проходять в системах водоочищення, з'являється можливість проводити віртуальні експерименти без ризику для споживачів, досліджувати зміну якості води в реальному часі, передбачувати поведінку системи за реальних умов водоочищення, розробляти стратегії аварійного реагування у випадку пошкодження обладнання або порушення енергопостачання, а також прогнозувати просторовий розподіл залишкових концентрацій ClO_2 у мережі водопостачання, ефективність промивання мережі після аварій або забруднень тощо.

Моделі можуть бути використані для вивчення кінетики взаємодії окиснювача з домішками в воді, що очищується (зокрема, розроблення та розв'язання кінетичних моделей типу (1)), прогнозування ефективності знезараження залежно від ступеня забрудненості води, її температури та рН, оцінки залишкової концентрації ClO_2 у воді після очищення та розподілу; виявлення критичних умов, за яких знижується ефективність дії реагенту або утворення небажаних побічних продуктів. Типова кінетична модель процесу водоочищення в даному випадку має вигляд [12, 13]:

$$\frac{dC_{\text{ClO}_2}}{dt} = -k_1 \cdot C_{\text{ClO}_2} \cdot C_{\text{cont}} - k_2 \cdot C_{\text{ClO}_2} \cdot C_{\text{Fe}} - k_3 \cdot C_{\text{ClO}_2}^2, \quad (1)$$

де C_{ClO_2} – концентрація діоксиду хлору, C_{cont} – вміст у воді домішок, які можуть бути знешкоджені діоксидом хлору, C_{Fe} – вміст сполук феруму, k_i – константи швидкостей реакцій.

Реалізація у вигляді комп'ютерної моделі кінетичних рівнянь (1) спільно з відповідними початковими умовами дає змогу передбачити зміну концентрацій реагентів у часі й оцінити залишкову концентрацію активного окисника у воді після певної тривалості контакту.

Інший клас математичних моделей враховує розподіл речовин у просторі (наприклад, уздовж реактора або трубопроводу), та описується рівняннями з розподіленими параметрами типу [14, 15]:

$$\frac{\partial C_{\text{ClO}_2}}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C_{\text{ClO}_2}}{\partial x^2} - v \cdot \frac{\partial C_{\text{ClO}_2}}{\partial x} - k \cdot C_{\text{ClO}_2}^2, \quad (2)$$

де D – коефіцієнт дифузії, v – швидкість руху потоку, k – узагальнена константа споживання реагенту.

Чисельне розв'язання рівнянь виду (2), наприклад, з використанням комп'ютерних програмних комплексів, які моделюють поведінку рідин і газів за допомогою чисельного розв'язання рівнянь руху (Computational Fluid Dynamics/CFD-систем), дозволяє визначити розподіл концентрації ClO_2 уздовж проточного реактора чи трубопроводу, оптимізувати місце введення реагенту та розраховувати необхідну дозу для забезпечення нормативної залишкової концентрації на виході зі станції.

Важливим, з практичної точки зору, є статистичне опрацювання й узагальнений аналіз (моделювання) «часових рядів» моніторингу процесів експлуатації схем очищення [16, 17]. Обробка даних моніторингу включає фільтрацію шумів, нормування, побудову трендів, автокореляційний і спектральний аналіз, і дозволяє виявити періодичні коливання, сезонні залежності й аномалії.

Також, одним із завдань, які можуть бути вирішені засобами математичного моделювання, є оптимізація дози реагенту у процесі очищення. Очевидно, що надлишкові дози реагенту призводять до підвищення вартості очищення і збільшення ступеню утворення побічних продуктів, тоді як недостатня доза не гарантує належної інактивації патогенів. Знайти оптимальні значення параметрів процесу водоочищення можна використовуючи експериментально-статистичні багатофакторні моделі типу (3) і так звану методологію аналізу поверхні відгуку:

$$\text{OptDose}_{\text{ClO}_2} = f(T, \text{pH}, C_{\text{cont}}, C_{\text{Fe}}, t_{\text{конт}}) \rightarrow \text{opt}, \quad (3)$$

де $\text{OptDose}_{\text{ClO}_2}$ – шукана оптимальна доза діоксиду хлору, f – деяка функція (поліноміальна [18-20], нейромережева [21-23] тощо), C_{cont} – вміст у воді домішок, які можуть бути знешкоджені діоксидом хлору, C_{Fe} – вміст сполук феруму, $T, \text{pH}, t_{\text{конт}}$ – відповідно температура та рН води і тривалість контакту.

Планування експерименту. У представленій роботі було побудовано експериментально-статистичні моделі за результатами «планованого» («активного») експерименту [24]. Цей підхід, на відміну від використання виключно даних моніторингу стану системи водоочищення [17], гарантує отримання математичних моделей, які за сумою властивостей є «більш корисними»: отримані за результатами «активного» експерименту моделі можуть, зокрема, бути використані для оптимізації умов функціонування технології [25, 26].

У випадку представленого дослідження, в якості факторів (незалежних змінних) експериментально-статистичних моделей було обрано наступні характеристики: X_1 – кислотність середовища, X_2 – температура води, що очищується, °С, X_3 – доза реагенту (сумарна), мг/дм³, X_4 – тривалість дії реагенту, год., X_5 – забрудненість води (в даному випадку – вміст загального органічного вуглецю, мг/дм³). Характеристиками «відгуку», тобто величинами, за якими можна кількісно оцінювати якість дії реагенту, було обрано частку витраченого на дезінфекцію діоксиду хлору (y_1) та вміст хлоритів в очищеній воді (y_2). Такий вибір відгуків зумовлений цілями дослідження (задачею мінімізації утворення побічних продуктів дезінфекції).

Експерименти проводилися за нелінійним центральним композиційним рототабельним планом (ЦКРП) [24]. Значення факторів експерименту у вихідній натуральній і кодованій формі представлено у табл. 1.

Центральний композиційний рототабельний план експерименту забезпечує ефективне дослідження простору факторів та визначення як лінійних, так і квадратичних ефектів, а також взаємодій між змінними. Структурно ЦКРП складається з факторної частини ($2^5 = 32$ точок), яка утворює план повного факторного експерименту із рівнями -1 і $+1$ (для кодованої форми представлення факторів); а також експериментів в «зіркових» (аксіальних) точках ($2 \times 5 = 10$ точок), що розташовані в факторному просторі на осях кожного з факторів на відстані «зоряного плеча» $\pm \alpha$ від центру плану; та точок «в центрі плану» для оцінки

експериментальної похибки та перевірки адекватності моделі. Ключовою характеристикою даного плану є рототабельність, тобто властивість, за якої статистична характеристика розсіювання (дисперсія) передбачених значень відгуку залишається сталою для всіх точок, які лежать на однаковій відстані від центру експериментального факторного простору. Рототабельність досягається шляхом правильного вибору значення α , яке для дворівневого плану й для п'яти факторів обчислюється як $\alpha = (2^k)^{1/4} = (2^5)^{1/4} = 2^{1,25} \approx 2,378$, де $k = 5$ – кількість факторів [24]. Таке значення забезпечує рівномірну точність прогнозу в межах усього експериментального простору.

Таблиця 1

Значення технологічних факторів експерименту

Технологічний вміст	Натуральні					Кодовані			
	дескриптор	low	up	mid	ΔX	дескриптор	low	up	mid
pH	X_1	6	9	7,5	3	x_1	-1	1	0
Температура реакції, °C	X_2	4	25	14,5	21	x_2	-1	1	0
Доза діоксиду хлору, мг/дм ³	X_3	1	6	3,5	5	x_3	-1	1	0
Тривалість реакції, год	X_4	1	20	10,5	19	x_4	-1	1	0
Вміст заг. орг. вуглецю, мг/дм ³	X_5	10	30	20	20	x_5	-1	1	0

Примітка: low – нижній рівень варіювання фактора (нижня границя факторного простору), up – верхній рівень варіювання фактора, mid – середнє значення, центр факторного простору, ΔX – ширина діапазону варіювання.

План експерименту в даному випадку включає 32 факторні + 10 аксіальних + 5 центральних точок, тобто загалом 50 дослідів. Ця кількість є прийнятною для побудови повної квадратичної моделі, яка в загальному випадку (до відбраковки незначущих регресорів) включає 21 доданок (5 лінійних, 10 попарних взаємодій і 5 квадратичних ефектів, а також константу-вільний член).

Застосування структурованого плану експерименту забезпечує контрольовану варіацію факторів у всьому діапазоні дослідження та рівномірне охоплення факторного простору. Така організація дає змогу обґрунтовано зменшити кількість проведених лабораторних дослідів, забезпечуючи при цьому отримання достатнього обсягу даних для достовірного відтворення основних закономірностей досліджуваного процесу. На наступному етапі досліджень була проведена практична реалізація матриці планування експерименту.

Аналіз результатів експерименту. Якісно проаналізувати результати експерименту дає змогу просторова візуалізація експериментальних даних (рис. 1), на якій значення експериментальних відгуків приписано до відповідних їм точок у факторному просторі у вигляді “куба”, що відповідає комбінаціям рівнів трьох варійованих факторів за фіксованих значень двох інших.

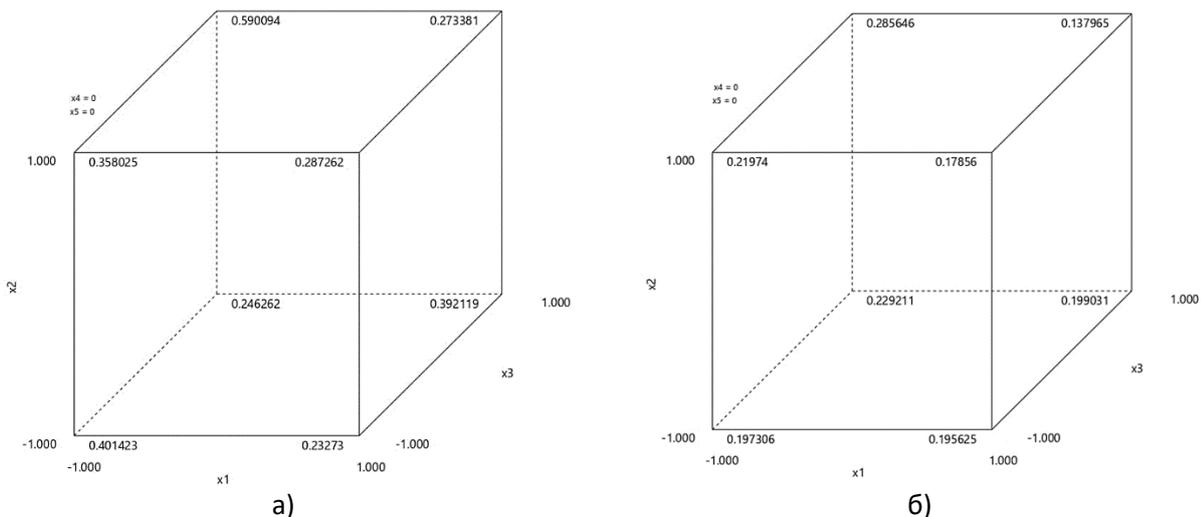


Рис. 1. Відображення технологічних відгуків у факторному просторі: а – для відгуку y_1 , б – для відгуку y_2 (частина факторів зафіксована в центрі факторного простору – $x_4=0, x_5=0$)

На вершинах факторного куба наведені деякі значення експериментальних відгуків y_1 (рис. 1, а) та y_2 (рис. 1, б), що відображають вплив комбінацій базових рівнів факторів на відповідно частку витраченого на дезінфекцію діоксиду хлору та на ступінь утворення хлоритів. Такий спосіб візуалізації демонструє локальну

поведінку досліджуваної системи у області варіювання факторів (табл. 1), дозволяючи візуально оцінити характер зміни відгуків вздовж кожної осі та можливі взаємодії між факторами. На основі рис. 1 можна сформулювати низку конкретних технологічних висновків, які випливають із значень експериментальних відгуків u_1 , u_2 на границях факторного простору (тобто у вершинах і на гранях факторного кубу). Зокрема (як це видно з порівняння правої і лівої граней куба, рис. 1, б), зі збільшенням значень фактора x_3 (доза реагенту) значення u_2 на відповідних вершинах зростають. Це свідчить про те, що надлишкове дозування діоксиду хлору сприяє утворенню більшої кількості хлоритів, що технологічно небажано. Також, на верхній грані (висока температура) значення u_2 більші, ніж на нижній. Отже, підвищення температури очищуваної води інтенсифікує утворення хлоритів, і при технологічному контролі варто враховувати сезонність.

Наявність помітної асиметрії розподілу значень u_1 та u_2 на різних вершинах вказує на нелінійний характер моделі та значущі міжфакторні взаємодії, типові для нелінійного центрального композиційного плану. Зокрема, з аналізу рис. 1, б випливає, що найбільші значення відгуку u_2 дає поєднання високої температури та високої дози реагенту.

Висновки

Діоксид хлору є перспективним дезінфектантом для українських систем водопідготовки. Його застосування забезпечує підвищену ефективність окиснення та знезараження при погіршеній якості вихідної води, зменшення утворення канцерогенних побічних продуктів, безпечність експлуатації завдяки генерації реагенту на місці, стабільність технологічного процесу при коливаннях енергопостачання.

Застосована візуалізація експериментальних даних у формі «факторного кубу» дозволила попередньо передбачити області факторного простору, де ступінь використання окиснювача – максимальний, а утворення хлоритів мінімальне: низька доза реагенту, нижча температура та більш кисле середовище. Це може бути використано для оптимізації режимів дезінфекції при збереженні ефективності.

Наступним етапом представленого дослідження, будуть результати побудови нелінійних поліноміальних експериментально-статистичних моделей на основі отриманих експериментальних даних. Вказані моделі мають описувати частку діоксиду хлору, що вступив в реакцію, та концентрацію хлоритів у знезараженій воді і можуть бути використані для пошуку оптимальних компромісних режимів знезараження води в технології водоочищення.

Представлене дослідження було проведено в рамках науково-дослідних проектів «Технологічні засади мінімізації вмісту хлоритів у питній воді після знезараження діоксидом хлору» (номер державної реєстрації: 0125U001784) та «Комп'ютерне моделювання та оптимізація сталих технологічних схем водного господарства» (номер державної реєстрації: 0124U002127).

Література

1. Мокієнко А. Діоксид хлору: Монографія. Т. 1. Хімія. 2025. 611 с. URL: https://eprints.oa.edu.ua/id/eprint/9664/1/Dioksyd_hloru_T.1.pdf
2. Мокієнко А. В. Діоксид хлору: застосування у технологіях водопідготовки. 2-ге вид. перероб та доп. Одеса : Фенікс, 2021. 336 с.
3. Прокопов В.О., Липовецька О.Б., Куліш Т.В., Соболев В.А., Костюк В.А., Бондарчук А.Ю. Використання діоксиду хлору у технології підготовки питної води на Дніпровському водопроводі м. Києва. *Environment & health*. 2018. № 4. С. 15-19. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/dtz_2018_4_5
4. Новицький Д. Ю., Костюк В. А., Кобилянський В. Я. Діоксид хлору в аспекті мікробіологічної безпеки водопровідної води. *Science Review*. 2019. 4(21). С. 9-14. DOI: 10.31435/rsglobal_sr/31052019/6487
5. Xu M.-Y., Lin Y.-L., et al. Chlorine dioxide-based oxidation processes for water purification : A review. *Journal of Hazardous Materials*. 2022. Vol. 436. 129195. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.129195.
6. Прокопов В.О., Липовецька О.Б., та ін. Небезпечні хлорити у питній воді: утворення та видалення з використанням діоксиду хлору у технології водопідготовки. *Environment & health*. 2023. № 1. С. 43-50. DOI: 10.32402/dovkil2023.01.043
7. Прокопов В.О., Липовецька О.Б., Куліш Т.В. Дослідження вмісту в обробленій діоксидом хлору Дніпровській питній воді хлоритів та оцінка їхньої небезпеки для здоров'я водоспоживачів. *Environment & health*. 2024. № 3. С. 48–56. DOI: 10.32402/dovkil2024.03.048
8. ДСанПіН 2.2.4-171-10 "Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною". Из зм. і доп., вн. Нак. МОЗ України від 15.08.2011 №505, від 24.12.2019 №2675, від 18.02.2022 №341.
9. *Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda*. Geneva: World Health Organization; 2022. 614 p. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064>
10. *Directive (EU) 2020/2184 on the quality of water intended for human consumption of the European Parliament and of the Council*. 16 December 2020. URL: <https://lawthek.eu/detail/d7a5c23d-6ca3-4a5a-b6a2-96e6fd6264b7/en/SINGLE>

11. Про затвердження Державних санітарних норм та правил "Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною" 2.2.4-171–10. Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 12 травня 2010 року № 400. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 1 липня 2010 р. за № 452/17747. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text>
12. Song B., Yang H., et al. Disinfection byproducts formed from oxidation of pesticide micropollutants in water: Precursor sources, reaction kinetics, formation, influencing factors, and toxicity. *Chemical Engineering Journal*. 2023. V. 475. 146310. DOI: 10.1016/j.cej.2023.146310
13. Li Y., Chen J., et al. Degradation of the novel herbicide tiafenacil in aqueous solution: Kinetics, various influencing factors, hydrolysis products identification, and toxicity assessment. *Science of The Total Environment*. 2024. V. 952. 175937. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.175937
14. Greene D., et. al. CFD Design Approach for Chlorine Disinfection Processes. *Journal of the American Water Works Association*. 2004. 96. Pp. 138-50. DOI: 10.1002/j.1551-8833.2004.tb10685.x.
15. Soukane S., Ait-Djoudi F., et. al. Spiral-shaped reactor for water disinfection. *Desalination and Water Treatment*. 2016. V. 57 (48–49). Pp. 23443-23458. DOI: 10.1080/19443994.2016.1173385.
16. Karadirek E., Soyupak S., Muhammetoglu H. Chlorine modeling in water distribution networks using ARX and ARMAX model structures. *Desalination and Water Treatment*. 2016. 57 (25). Pp. 11592-11598. DOI: 10.1080/19443994.2015.1065769.
17. Бондарчук О., та ін. Моніторинг якості води та статистичний аналіз параметрів системи очищення води діоксидом хлору на Дніпровській водопровідній станції. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 2024. 337(32), С. 395-400. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-337-3-60
18. Harrington G.W., et. al. Developing a Computer Model to Simulate DBP Formation During Water Treatment. *Journal of American Water Works Association*. 1992. 84(11). Pp. 78-87. DOI: 10.1002/j.1551-8833.1992.tb05886.x
19. Korn C., Andrews R. C., Escobar M. D. Development of chlorine dioxide-related by-product models for drinking water treatment. *Water Research*. 2002. 36(1). Pp. 330–342. DOI: 10.1016/s0043-1354(01)00194-4
20. Zanetti M., Godio A., et. al. Chlorine dioxide by-products predictive models for drinking water oxidation treatment. *Water Science & Technology: Water Supply-WSTWS*. 2008. P. 331-338
21. Librantz A. F. H., dos Santos F. C. R., Dias C. G. Artificial neural networks to control chlorine dosing in a water treatment plant. *Acta Scientiarum. Technology*. 2018. V. 40. e37275. DOI: 10.4025/actascitechnol.v40i1.37275
22. Sato D. T., Belo O. M. O., et. al. Hybrid machine learning model for disinfectant dosing in small-scale water treatment under data scarcity. *Journal of Water Process Engineering*. 2025. V. 78. 108736. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.108736.
23. McKelvey S., Cheng Zh., et. al. Assessment of regulated and unregulated disinfection byproduct formation using chlorine dioxide pre-oxidation in pilot studies and data-driven modeling. *Journal of Hazardous Materials*. 2025. V. 497. 139729. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.139729.
24. *Вступ до планування оптимального експерименту*: навч. посібн. / Г.О. Статюха, Д.М. Складанний, О.С. Бондаренко. К.: ІВЦ «Політехніка», 2011. 117 с.
25. Apostol G., Kouachi R., Constantinescu I. Optimization of coagulation-flocculation process with aluminum sulfate based on response surface methodology. *UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*. 2011. 73(2). Pp. 77-84.
26. Suquet J., Godo-Pla Ll., et. al. Assessing the effect of catchment characteristics to enhanced coagulation in drinking water treatment: RSM models and sensitivity analysis. *Science of The Total Environment*. 2021. V. 799. 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149398.

References

1. Mokiienko A. (2025). Dioksyd khloru: Monohrafiia. T. 1. Khimiiia. 611 s. URL: https://eprints.ua.edu/id/eprint/9664/1/Dioksyd_khloru_T.1.pdf [in Ukrainian].
2. Mokiienko A. V. (2021). Dioksyd khloru: zastosuvannia u tekhnolohiiakh vodopidhotovky. 2-he vyd. pererob ta dop. Odesa : Feniks, 336 s. [in Ukrainian].
3. Prokopov V.O., Lypovetska O.B., Kulish T.V., Sobol V.A., Kostyuk V.A., Bondarchuk A.Iu. (2018) Vykorystannia dioksydu khloru u tekhnolohii pidhotovky pytnoi vody na Dniprovskomu vodoprovodi m. Kyieva. *Environment & health*. № 4. S. 15-19. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/dtz_2018_4_5 [in Ukrainian].
4. Novytskyi D. Yu., Kostyuk V. A., Kobylianskyi V. Ya. (2019) Dioksyd khloru v aspekti mikrobiolohichnoi bezpeky vodoprovodnoi vody. *Review*. 4(21). S. 9-14. DOI: 10.31435/rsglobal_sr/31052019/6487 [in Ukrainian].
5. Xu M.-Y., Lin Y.-L., et al. Chlorine dioxide-based oxidation processes for water purification : A review. *Journal of Hazardous Materials*. 2022. Vol. 436. 129195. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2022.129195.
6. Prokopov V.O., Lypovetska O.B., та ін. (2023) Nebezpechni khloroty u pytnii vodi: utvorennia ta vydalennia z vykorystanniam dioksydu khloru u tekhnolohii vodopidhotovky. *Environment & health*. № 1. S. 43-50. DOI: 10.32402/dovkil2023.01.043 [in Ukrainian].

7. Prokopov V.O., Lypovetska O.B., Kulish T.V. (2024). Doslidzhennia vmistu v obrobenii dioksydom khloru Dniprovskii pytnii vodi khlorytiv ta otsinka yikhnoi nebezpeky dlia zdorovia vodospozhyvachiv. *Environment & health*. № 3. S. 48–56. DOI: 10.32402/dovkil2024.03.048 [in Ukrainian].
8. DSanPiN 2.2.4-171-10 "Hihienichni vymohy do vody pytnoi, pryznachenoii dlia spozhyvannia liudynoiu". Iz zm. i dop., vn. Nak. MOZ Ukrainy vid 15.08.2011 №505, vid 24.12.2019 №2675, vid 18.02.2022 №341 [in Ukrainian].
9. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda. Geneva: World Health Organization; 2022. 614 p. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064>
10. Directive (EU) 2020/2184 on the quality of water intended for human consumption of the European Parliament and of the Council. 16 December 2020. URL: <https://lawthek.eu/detail/d7a5c23d-6ca3-4a5a-b6a2-96e6fd6264b7/en/SINGLE>
11. Pro zatverdzhennia Derzhavnykh sanitarnykh norm ta pravyl "Hihienichni vymohy do vody pytnoi, pryznachenoii dlia spozhyvannia liudynoiu" 2.2.4-171-10. Nakaz Ministerstva okhorony zdorovia Ukrainy vid 12 travnya 2010 roku № 400. Zareyestrovano v Ministerstvi yustytysyi Ukrainy 1 lypnya 2010 r. za № 452/17747. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text> [in Ukrainian].
12. Song B., Yang H., et al. Disinfection byproducts formed from oxidation of pesticide micropollutants in water: Precursor sources, reaction kinetics, formation, influencing factors, and toxicity. *Chemical Engineering Journal*. 2023. V. 475. 146310. DOI: 10.1016/j.ccej.2023.146310
13. Li Y., Chen J., et al. Degradation of the novel herbicide tiafenacil in aqueous solution: Kinetics, various influencing factors, hydrolysis products identification, and toxicity assessment. *Science of The Total Environment*. 2024. V. 952. 175937. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.175937
14. Greene D., et al. CFD Design Approach for Chlorine Disinfection Processes. *Journal of the American Water Works Association*. 2004. 96. Pp. 138-50. DOI: 10.1002/j.1551-8833.2004.tb10685.x.
15. Soukane S., Ait-Djoudi F., et al. Spiral-shaped reactor for water disinfection. *Desalination and Water Treatment*. 2016. V. 57 (48–49). Pp. 23443-23458. DOI: 10.1080/19443994.2016.1173385.
16. Karadirek E., Soyupak S., Muhammetoglu H. Chlorine modeling in water distribution networks using ARX and ARMAX model structures. *Desalination and Water Treatment*. 2016. 57 (25). Pp. 11592-11598. DOI: 10.1080/19443994.2015.1065769.
17. Bondarchuk O., ta in. (2024). Monitorynh yakosti vody ta statystychnyi analiz parametriv systemy ochyshchennia vody dioksydom khloru na Dniprovskii vodoprovodnii stantsii. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 337(32), S. 395-400. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-337-3-60 [in Ukrainian].
18. Harrington G.W., et al. Developing a Computer Model to Simulate DBP Formation During Water Treatment. *Journal of American Water Works Association*. 1992. 84(11). Pp. 78-87. DOI: 10.1002/j.1551-8833.1992.tb05886.x
19. Korn C., Andrews R. C., Escobar M. D. Development of chlorine dioxide-related by-product models for drinking water treatment. *Water Research*. 2002. 36(1). Pp. 330–342. DOI: 10.1016/s0043-1354(01)00194-4
20. Zanetti M., Godio A., et al. Chlorine dioxide by-products predictive models for drinking water oxidation treatment. *Water Science & Technology: Water Supply-WSTWS*. 2008. P. 331-338
21. Librantz A. F. H., dos Santos F. C. R., Dias C. G. Artificial neural networks to control chlorine dosing in a water treatment plant. *Acta Scientiarum. Technology*. 2018. V. 40. e37275. DOI: 10.4025/actascitechnol.v40i1.37275
22. Sato D. T., Belo O. M. O., et al. Hybrid machine learning model for disinfectant dosing in small-scale water treatment under data scarcity. *Journal of Water Process Engineering*. 2025. V. 78. 108736. DOI: 10.1016/j.jwpe.2025.108736.
23. McKelvey S., Cheng Zh., et al. Assessment of regulated and unregulated disinfection byproduct formation using chlorine dioxide pre-oxidation in pilot studies and data-driven modeling. *Journal of Hazardous Materials*. 2025. V. 497. 139729. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2025.139729.
24. Vstup do planuvannia optymalnoho eksperymentu: navch. posibn. / H.O. Statiukha, D.M. Skladannyi, O.S. Bondarenko. K.: IVTs «Politekhnik»/ 117 s. [in Ukrainian].
25. Apostol G., Kouachi R., Constantinescu I. Optimization of coagulation-flocculation process with aluminum sulfate based on response surface methodology. *UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science*. 2011. 73(2). Pp. 77-84.
26. Suquet J., Godo-Pla LL., et al. Assessing the effect of catchment characteristics to enhanced coagulation in drinking water treatment: RSM models and sensitivity analysis. *Science of The Total Environment*. 2021. V. 799. 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.149398.