

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-365-53>

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](mailto:Bondarchukau@gmail.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](mailto:amshakhn@kpi.ua)

### 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](mailto:lar_spas@yahoo.com)

### СУББОТА ІРИНА

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

<https://orcid.org/0000-0002-1581-8513>

e-mail: [i.subota@kpi.ua](mailto:i.subota@kpi.ua)

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ ДІОКСИДОМ ХЛОРУ: 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ

У статті проведено оцінювання технологічної доцільності впровадження діоксиду хлору як альтернативного дезінфекційного агенту в системах централізованого водопостачання України з урахуванням операційних ризиків, що виникають унаслідок пошкодження інфраструктури та зниження якості вихідної води під час воєнних дій. Застосовано підхід на основі математичного й комп'ютерного моделювання процесів водоочищення; для технології знезараження води, побудованої на використанні діоксиду хлору, визначено оптимальні умови дозування реагенту, що покликані забезпечувати мінімізацію утворення побічних продуктів. На основі експериментальних даних побудовано квадратичні поліноміальні експериментально-статистичні моделі, що описують частку діоксиду хлору, що вступив в реакцію, та концентрацію хлоритів у знезараженій воді.

Вихідними даними для параметричної ідентифікації моделей були результати активного багатofакторного експерименту, проведеного за центральним композиційним рототабельним планом (технологічні фактори – рН, температура води, доза реагенту, тривалість реакційного контакту, вміст у природній воді органічних речовин).

Для пошуку оптимальних режимів застосовано багатоцільову оптимізацію з використанням функції бажаності Харрінгтона. Це дозволило знайти компроміс між максимізацією ефективності знезараження та мінімізацією утворення побічних продуктів. Запропонований підхід дає можливість використовувати моделі як основу цифрових двійників схем водоочищення ліній та обґрунтовувати дози реагентів за різних умов якості води. Результати дослідження можуть слугувати базою для модернізації систем водопідготовки та впровадження адаптивного дозування діоксиду хлору на водоканалах України.

**Ключові слова:** очищення природної води, знезаражування, діоксид хлору, хлорити, моніторинг, статистичний аналіз.

**BONDARCHUK OLEKSANDR, SHAKHNOVSKY ARCADY, SPASONOVA LARYSA, SUBBOTA IRYNA**  
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

## INVESTIGATION OF WATER TREATMENT PROCESSES USING CHLORINE DIOXIDE: 2. MATHEMATICAL MODELLING AND OPTIMIZATION

The present article assesses the technological feasibility of introducing chlorine dioxide as an alternative disinfection agent in centralized water supply systems of Ukraine, taking into account operational risks arising from damage to infrastructure and a decrease in the quality of source water during military operations. An approach based on mathematical and computer modelling of water treatment processes is applied; for the chlorine-dioxide-based disinfection technology, optimal reagent dosing conditions were identified to minimise the formation of disinfection by-products. Based on experimental data, quadratic polynomial experimental–statistical models were developed to describe the fraction of reacted chlorine dioxide and the concentration of chlorites in disinfected water.

The input data for the parametric identification of the models were obtained from an active multifactor experiment conducted using a central composite rotatable design (technological factors included pH, water temperature, reagent dose, reaction contact time, and the content of organic matter in natural water).

To determine optimal operating conditions, multi-objective optimization was performed using the Harrington desirability function. This made it possible to find a balance between maximizing disinfection efficiency and minimizing by-product formation. The proposed approach enables the use of the models as digital twins of the technological treatment line and supports the justification of reagent dosing under varying raw water quality conditions. The findings of the study may serve as a basis for modernizing water treatment systems and implementing adaptive chlorine dioxide dosing at water utilities in Ukraine.

**Keywords:** natural water treatment, disinfection, chlorine dioxide, chlorites, monitoring, statistical analysis.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.02.2026

Прийнята до друку / Accepted 11.03.2026

Опубліковано / Published 28.05.2026



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, Шахновський Аркадій, Спасьонова Лариса, Суббота Ірина

### Постановка проблеми

В умовах навантаження на водопровідно-каналізаційну інфраструктуру України, спричиненого воєнною агресією РФ, різко зростають ризики хімічного й мікробіологічного забруднення джерел питного

водопостачання. Порушення роботи водоканалів та пошкодження систем очищення створюють критичні виклики для забезпечення епідемічної безпеки населення. За таких обставин дослідження сучасних технологій дезінфекції природної води стає ключовим чинником підвищення надійності та стійкості систем водопідготовки.

Представлена раніше перша з двох частин даного дослідження [1] була присвячена питанням структурної ідентифікації (вибору типу) математичних моделей процесів дезінфекційної обробки природної води.

Метою наступного етапу дослідження, результати якого представлені у цій публікації, була параметрична ідентифікація математичних моделей процесів дезінфекційної обробки природної води й утворення побічних продуктів дезінфекції, а також питань прийняття інженерно-технологічних рішень за результатами моделювання.

### Аналіз досліджень та публікацій

Аналіз сучасних досліджень і публікацій щодо проблем впровадження технологій дезінфекції природної води на українських водоканалах було представлено у попередній публікації [1], присвяченій питанням структурної ідентифікації математичних моделей та плануванню експериментів з вивчення процесів утворення побічних продуктів у процесах дезінфекційної обробки природної води.

На значній кількості вітчизняних водоканалів функціонує традиційна «класична» схема водопідготовки (коагуляція, відстоювання, фільтрація та знезараження), причому на стадії дезінфекції природної води застосовується переважно газоподібний хлор або гіпохлорит натрію. Ці технології є порівняно простими в реалізації, достатньо ефективними з епідеміологічної точки зору; їх функціонування забезпечується достатньою кількістю кваліфікованого персоналу, підготованого в попередні роки. Однак, транспортування, зберігання та дозування газоподібного хлору пов'язане з підвищеною техногенною небезпекою, особливо під час воєнних дій. Гіпохлорит натрію, хоча й розглядається як безпечніша альтернатива, залежить від енергопостачання та має обмежену стабільність під час зберігання; його ефективність змінюється при коливаннях температури та якості вихідної води. Також, застосування хлорвмісних реагентів у процесах знезараження води супроводжується утворенням небажаних побічних продуктів (тригалометанів, галогеноцтових кислот тощо) [2, 3]. У вітчизняній практиці застосовується також хлор-амонізація як метод пролонгованої дії, якому притаманне зменшене (порівняно з газоподібним хлором) утворення тригалометанів. Однак, хлор-амонізація характеризується низькою окиснювальною здатністю, можливим утворенням низки інших токсичних сполук (зокрема, галоацетонітрилів), техногенними ризиками через застосування аміаку та хлору.

Діоксид хлору є сильним окисником, здатним ефективно інактивувати бактерії, віруси, спори та цисти найпростіших, сприяти видаленню біоплівки та забезпечувати стабільну залишкову концентрацію у мережі [4, 5]. Перевагами діоксиду хлору також є висока ефективність у широкому діапазоні рН, відносно низька доза знезараження та мінімальна кількість утворення вищезазначених хлорвмісних побічних продуктів [4]. При цьому використання діоксиду хлору супроводжується утворенням інших побічних продуктів – хлоритів та хлоратів. Відповідно до Державних санітарних норм та правил ДСанПіН 2.2.4-171-10 [6] вміст хлоритів у питній воді регламентується на рівні 0,2 мг/дм<sup>3</sup>. За міжнародними [7] та європейськими [8] вимогами норматив для хлоритів і хлоратів складає 0,7 мг/дм<sup>3</sup> (для систем очищення з використанням діоксиду хлору), що відображено у ДСанПіН щодо питної води на «воєнний час» [9].

Отже, перехід на альтернативні реагенти для знезараження вимагає у сучасних умовах системних досліджень задля балансування «хімічних» ризиків (тобто, утворення шкідливих продуктів дезінфекції) з «біологічними» ризиками (тобто, ризиками недостатнього рівня санітарної обробки питної води).

### Виклад основного матеріалу

**Планування експерименту.** Як було зазначено в першій частині даного дослідження [1], для оптимізації процесів знезараження природної води діоксидом хлору передбачалася побудова експериментально-статистичних моделей [10-13] за результатами «планового» («активного») експерименту.

Виходячи з цілей дослідження, факторами (незалежними змінними експериментально-статистичних моделей) було обрано наступні: рН середовища ( $X_1$ ), температуру води, що очищується, °С ( $X_2$ ), сумарну дозу реагенту – діоксиду хлору, мг/дм<sup>3</sup> ( $X_3$ ), тривалість дії реагенту, год. ( $X_4$ ) та характеристику забрудненості води (в даному випадку – вміст загального органічного вуглецю, мг/дм<sup>3</sup> –  $X_5$ ). Величинами, за якими можна кількісно оцінювати «якість дії» реагенту, тобто утворення побічних продуктів, були: частка витраченого на дезінфекцію діоксиду хлору ( $y_1$ ) та вміст хлоритів в очищеній воді ( $y_2$ ). Експерименти було реалізовано за попередньо складеним центральним композиційним рототабельним планом (ЦКРП) [14], який є одним із найпоширеніших типів планів у методології експериментально-статистичного аналізу поверхонь відгуку.

**Параметрична ідентифікація та статистична перевірка математичних моделей.** Отримані внаслідок реалізації плану експерименту величини експериментальних відгуків ( $y_1, y_2$ ) було «приписано» до відповідних їм рядків плану експерименту (точок факторного простору). Отриману таким чином розширену матрицю планування експерименту було перетворено згідно алгоритму матричного методу найменших квадратів для визначення коефіцієнтів експериментально-статистичних багатофакторних моделей. В якості конкретного вигляду моделей було обрано поліноми другого порядку (1):

$$y_u = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ii} x_i^2 + \sum a_{ij} x_i x_j, \quad (1)$$

де  $y_u$  ( $u = 1, 2$ ) – функції – технологічні відгуки,  $x_i$  ( $i = 1, \dots, 5$ ) – незалежні змінні – фактори,  $a_i, a_{ij}$  ( $i, j = 1, \dots, 5$ ) – шукані коефіцієнти моделі.

Після параметричної ідентифікації було виконано статистичну валідацію моделей для вивчення їх точності й адекватності, а також значущості окремих їх доданків, дослідження реального впливу факторів, достовірності прогнозів і надійності отриманої поверхні відгуку. Для статистичної перевірки моделей було використано алгоритми дисперсійного аналізу (Analysis of Variance, ANOVA).

**Аналіз графічних відгуків.** На початковому етапі «прийняття рішень» за отриманими моделями було реалізовано побудову та вивчення поверхонь технологічних відгуків (рис. 1) – кроки, рекомендовані класичною методологією аналізу графічних відгуків [15, 16].

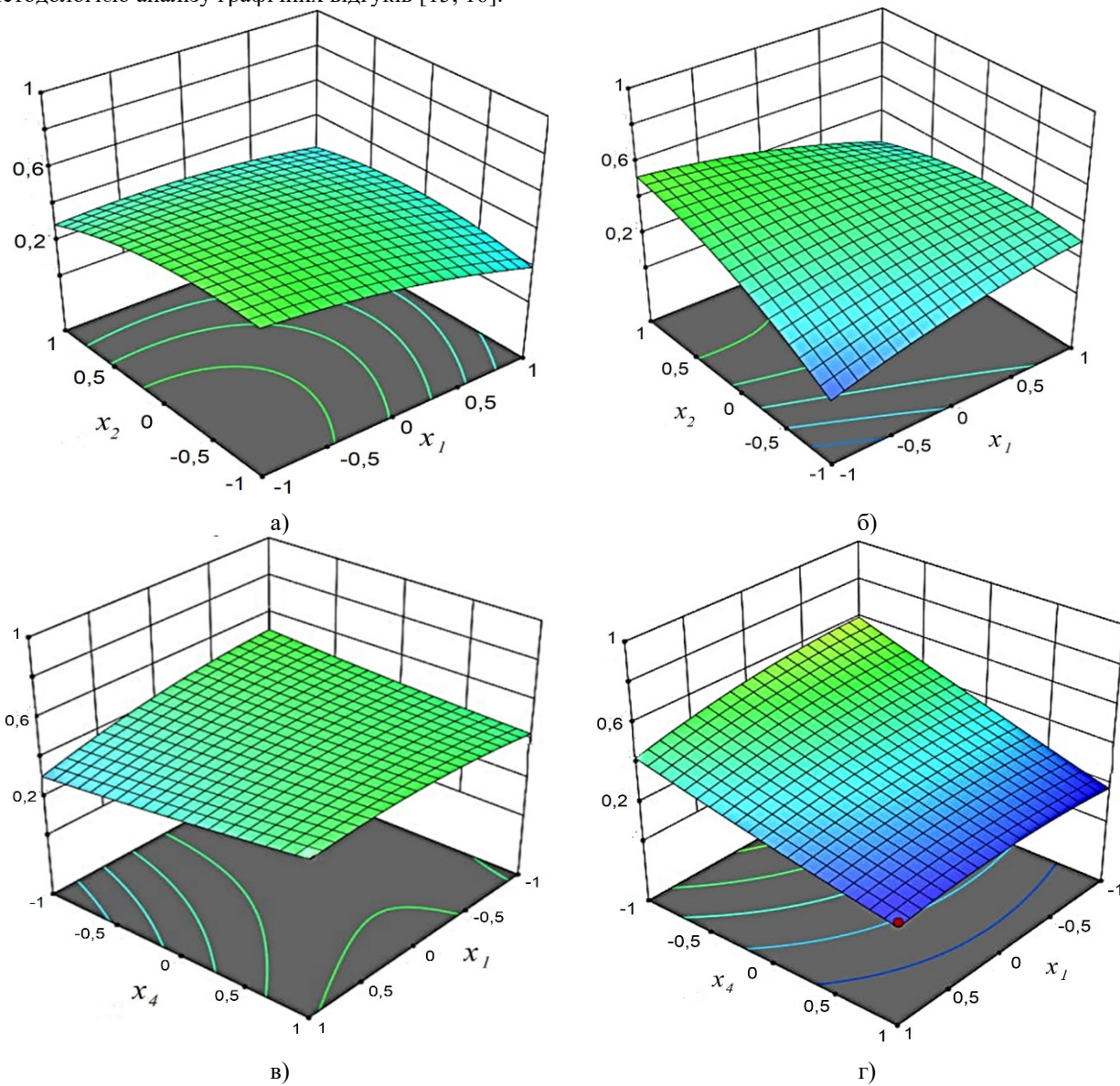


Рис. 1. До аналізу візуальних технологічних відгуків

Слід зауважити, що зі збільшення кількості факторів у побудові й інтерпретації графічних відгуків виникають суттєві труднощі. Основна проблема полягає у високій розмірності простору факторів. Поверхня відгуку, що є багатовимірною функцією, для двох факторів легко візуалізується у вигляді поверхні або контурного графіка. Проте для п'яти факторів простір відгуку має п'ять вимірів, що, очевидно, не може бути безпосередньо зображено на площині або у тривимірному просторі. Тому було застосовано «перерізи» багатовимірної поверхні, коли одночасно варіюються лише два фактори, а решта факторів встановлюються на фіксованих рівнях. Такі часткові проєкції багатовимірного простору не завжди відображають повну картину поведінки досліджуваної системи. Зокрема, побудована у просторі  $x_1 - x_2$  поверхня відгуку для змінної  $y_1$  суттєво відрізняється при фіксуванні решти факторів на рівнях  $x_3=0, x_4=-1, x_5=0$  (рис. 1, а) та при фіксуванні факторів на рівнях  $x_3=0, x_4=1, x_5=0$  (рис. 1, б). Аналогічно, для змінної  $y_2$  суттєво відмінними є графічні відгуки в просторі  $x_1 - x_4$  при фіксуванні решти факторів на рівнях  $x_2=-1, x_3=-1, x_5=1$  (рис. 1, в) та на рівнях  $x_2=-1, x_3=1, x_5=1$  (рис. 1, г).

Непрямым підтвердженням адекватності отриманих моделей та достовірності побудованих графічних відгуків є відповідність графіків відомим фактам. Зокрема, при високому рН діоксид хлору частково диспропорціонує з утворенням хлоритів та хлоратів, в той час як при низькому рН діоксид хлору менше розкладається з утворенням меншої кількості побічних продуктів. Так само, залежність  $y_2$  зростає зі збільшенням рН тощо.

Згідно методології аналізу поверхонь відгуку було реалізовано також квазіоднофакторний аналіз – метод дослідження впливу окремих факторів на цільові функції у межах багатфакторного експерименту, коли всі інші фактори фіксуються на певних рівнях [14]. Даний аналіз (рис. 2) враховує наявні взаємодії та нелінійності, описані в рівнянні регресії (1).

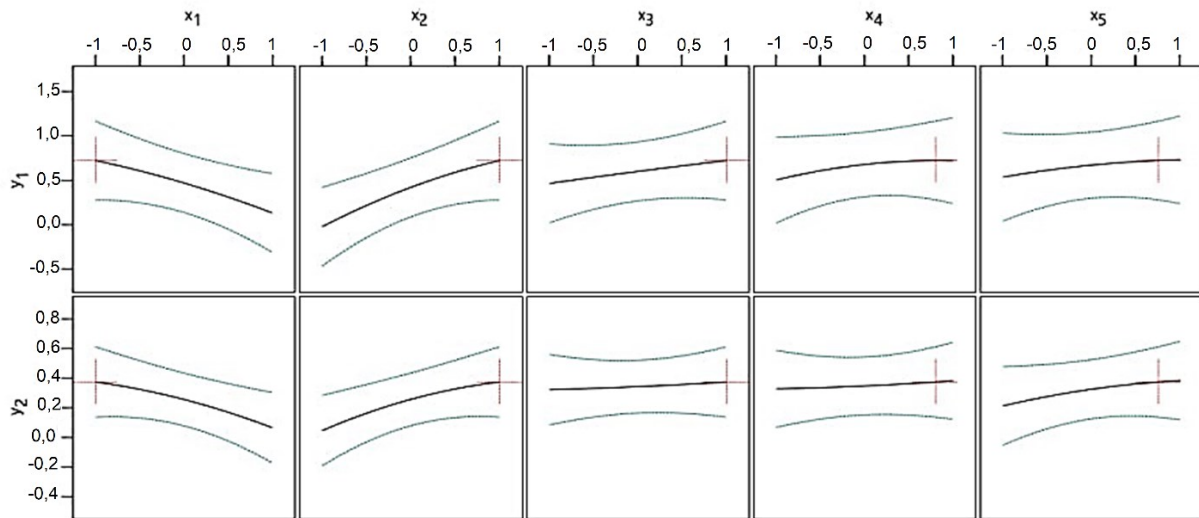


Рис. 2. Квазіоднофакторний аналіз моделей утворення побічних продуктів водоочищення

Графіки квазіоднофакторного аналізу (рис. 2) демонструють, як змінюються відгуки  $y_1$ ,  $y_2$  при поступовій зміні одного фактора в межах його досліджуваного діапазону, тоді як усі інші фактори залишаються на сталих рівнях (в даному випадку – при  $(x_1=-1, x_2=1, x_3=1, x_4=1, x_5=1)$ ). Таким чином, цей метод дозволяє візуально оцінити індивідуальний внесок кожного фактора в поведінку системи.

Як видно з рис. 2, функція  $y_2$  є малочутливою до зміни факторів  $x_3$ ,  $x_4$  (тобто зміна функції при зміні виключно цих факторів має вигляд практично прямої лінії, паралельної осі абсцис). Також, цей тип аналізу показав стабільність факторів в межах факторного простору (відсутність стрімких змін графіків на рис. 2).

Слід акцентувати, що класичний аналіз поверхонь відгуку є в достатній мірі практично корисним. Зокрема, вивчення графічних відгуків показало, які саме параметри (як-от: доза діоксиду хлору та ступінь забрудненості води) мають найбільший вплив на концентрацію хлоритів у воді після очищення, що дало змогу попередньо оцінити набір факторів, які найбільш суттєво впливають на вміст хлоритів при одночасному досягненні необхідної залишкової дози діоксиду хлору.

При цьому, головним викликом при роботі з п'ятифакторною технологічною системою в межах методології аналізу відгуків виявилось збереження наочності та коректна інтерпретація багатовимірних залежностей. Для отримання комплексних адекватних рішень щодо доз реагенту, оптимальних в сенсі утворення побічних продуктів дезінфекції, було вирішено перейти до числової оптимізації.

**Числова оптимізація відгуків.** Зважаючи на складний характер досліджуваних процесів, використання одного критерію оптимальності не забезпечуватиме всебічного урахування всіх вимог до якості обробленої води. У зв'язку з цим було реалізовано багатокритеріальний підхід до оптимізації, у рамках якого одночасно розглядалися два взаємопов'язані показники: частка діоксиду хлору, що вступив у реакцію ( $y_1$ ) та концентрація хлоритів у знезараженій воді ( $y_2$ ). Тобто згадані вище експериментально-статистичні моделі (1) було використано в якості критеріїв (цільових функцій) оптимальності задачі оптимізації дозування дезінфектанту. При цьому, перший критерій підлягає максимізації, оскільки він характеризує ефективність використання окисника та рівень знезараження. Другий критерій, навпаки, повинен бути мінімізований, адже хлорити є небажаними побічними сполуками, що погіршують якість питної води. Таким чином, сформульована задача має багатоцільовий характер, де критерії є конфліктуючими, й застосування методів багатоцільової оптимізації має забезпечувати пошук компромісних умов процесу.

Для реалізації чисельного пошуку оптимального рішення задачі багатоцільової оптимізації було використано підхід, заснований на функції бажаності Харрінгтона [17, 18], який дає змогу поєднати декілька критеріїв в єдиній інтегральній цільовій функції. Така безрозмірна функція відображає ступінь відповідності процесу бажаним технологічним і санітарно-хімічним показникам. Згідно зі вказаним підходом, кожен частковий відгук  $y_i$  перетворюється на безрозмірну функцію бажаності  $d_i$ , що приймає значення від 0 до 1:  $d_i = 0$  відповідає повністю небажаному результату, тоді як  $d_i = 1$  означає досягнення оптимального рівня показника. Для кожного критерію визначається власна функція бажаності залежно від його спрямування – на максимізацію (для  $y_1$ ) або мінімізацію (для  $y_2$ ).

Часткові функції бажаності узагальнюються за допомогою геометричного середнього, що дозволяє обчислити інтегральну функцію бажаності:

$$D = \sqrt[u]{d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_u} \quad (2)$$

де  $d_i$  ( $i = 1, 2$ ) – часткові функції бажаності,  $u = 2$  – кількість цільових показників.

Отримане значення  $D$  виступає інтегральним критерієм якості процесу, який відображає ступінь досягнення бажаного балансу між ефективністю знезараження та мінімальним утворенням побічних продуктів.

Для пошуку оптимуму узагальненого показника бажаності  $D$  було використано еволюційні методи (які підвищують ймовірність досягнення глобального екстремуму). Результати оптимізації дали шукану комбінацію факторів, що відповідає компромісному оптимуму  $u_1, u_2$  за заданих умов. Зокрема, в даному випадку чисельна оптимізація показала наступні рекомендовані значення технологічних факторів:  $x_1 = -1, x_2 = 1, x_3 = 1, x_4 = 0,81, x_5 = -1$  (в натуральних значеннях  $X_1 = 6, X_2 = 25$  °C,  $X_3 = 6$  мг/дм<sup>3</sup>,  $X_4 = 18,2$  год.,  $X_5 = 10$  мг/дм<sup>3</sup>). Слід, однак, зазначити, що наведений вище компромісний оптимум відповідає граничним значенням факторного простору, зокрема підвищеній дозі діоксиду хлору. З технологічної точки зору, рекомендоване значення дози  $\text{ClO}_2$  на рівні близько 6 мг/дм<sup>3</sup> є надмірним для знезараження води поверхневих джерел навіть за підвищеного вмісту загального органічного вуглецю. Практика експлуатації систем централізованого водопостачання свідчить, що для природних вод доцільні робочі дози діоксиду хлору часто не перевищують 2,0-2,5 мг/дм<sup>3</sup> (принаймні у випадку передокиснення). З урахуванням цього було зроблено припущення щодо зменшення компромісного оптимуму в область менших доз реагенту (із додаванням відповідного додаткового обмеження до системи обмежень математичної задачі оптимізації). В результаті повторного вирішення задачі оптимізації в уточненому вигляді отримано наступні значення технологічних факторів:  $x_1 = -0,5, x_2 = 0, x_3 = -0,25, x_4 = 0,8, x_5 = -1$  (в натуральних значеннях  $X_1 = 6,75, X_2 = 14,5$  °C,  $X_3 = 2,88$  мг/дм<sup>3</sup>,  $X_4 = 18,1$  год.,  $X_5 = 10$  мг/дм<sup>3</sup>). Зменшення дози  $\text{ClO}_2$  супроводжується одночасним зниженням частки витраченого реагенту та обмеженням утворення хлоритів, тобто покращенням обох критеріїв оптимізації. Компенсація зменшення окиснювальної дії досягається за рахунок корекції інших керованих факторів процесу, зокрема підтримання слабкокислих – нейтральних значень рН, збільшення тривалості контакту та роботи в типовому температурному діапазоні.

### Висновки

Діоксид хлору розглядається як перспективний дезінфекційний агент для українських систем водопідготовки, оскільки його використання забезпечує високоефективне окиснення та знезараження навіть за погіршеної якості вихідної води, знижує утворення канцерогенних побічних продуктів, підвищує безпеку експлуатації завдяки можливості генерації реагенту на місці та забезпечує стабільність технологічного процесу за коливань параметрів енергопостачання.

В умовах військових дій, коли фізичний доступ до натурних досліджень може бути обмежений, цифрове моделювання стає важливим способом підтримки технологічного контролю і прийняття рішень на основі прогнозів.

У перспективі застосування математичного і комп'ютерного моделювання процесів очищення води в Україні, крім подальшого розвитку алгоритмів моделювання утворення побічних продуктів для оцінки екологічних ризиків і гармонізації з європейськими нормативами, також може бути спрямоване на створення баз даних кінетичних параметрів для типових водних систем різних регіонів, розроблення гібридних моделей, які поєднують фізико-хімічні (детерміновані) і експериментально-статистичні рівняння з алгоритмами машинного навчання, використання відкритих цифрових платформ для обміну результатами між водоканалами та науковими установами, вдосконалення методів візуалізації просторового розподілу реагенту у мережах та його впливу на якість води.

*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. Бондарчук, О., Спасьонова, Л., Шахновський, А., & Квітка, О. (2026). Дослідження процесів очищення води діоксидом хлору: 1. планування експериментів. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 363(2), 237-243. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-32>
2. Sadiq R., Rodriguez M.J. Disinfection by-products (DBPs) in drinking water and predictive models for their occurrence: a review. *Science of the Total Environment*. 2004. 321. Pp. 21–46.
3. Ковальчук Л. Й., Петренко Н. Ф., Мокієнко А. В. Щодо утворення тригалометанів при очищенні води поверхневих водойм Українського Придунав'я: вибір окислювача. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2015. Вип. 59. С. 267-272. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vodaba\\_2015\\_59\\_41](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vodaba_2015_59_41)
4. 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](https://eprints.oa.edu.ua/id/eprint/9664/1/Dioksyd_hloru_T.1.pdf)
5. Мокієнко А.В. Діоксид хлору. Том 2. Мікробіологія. Монографія. 2025. 415 с. URL <https://eprints.oa.edu.ua/id/eprint/10270/>
6. *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>
7. *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>

8. 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>
9. Державні санітарні норми і правила «Показники безпечності та окремі показники якості питної води в умовах воєнного стану та надзвичайних ситуаціях іншого характеру». Затверджено Наказом Міністерства охорони здоров'я України 22 квітня 2022 року № 683. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0564-22#Тех>.
10. 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
11. 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
12. 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
13. 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.
14. *Вступ до планування оптимального експерименту*: навч. посібн. / Г.О. Статюха, Д.М. Складанний, О.С. Бондаренко. К.: ІВЦ «Політехніка», 2011. 117 с.
15. 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.
16. 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.
17. Danylkovych A., Lishchuk V., Shakhnovsky A. Improvement of structure determining qualitative characteristics of hydrophobized velour. *Vlákna a textile*. 2020. 27(3). Pp. 41-48. URL: [http://vat.ft.tul.cz/2020/3/VaT\\_2020\\_3\\_8.pdf](http://vat.ft.tul.cz/2020/3/VaT_2020_3_8.pdf)
18. Quero-Jiménez P. C., Hernández-Ramírez A., et.al. Use of experimental design for screening and optimization of variables influencing photocatalytic degradation of pollutants in aqueous media: A review of chemometrics tools. *Chemical Engineering Research and Design*. 2025. V. 220. Pp. 270-291. DOI: 10.1016/j.cherd.2025.07.009.

## References

1. Bondarchuk, O., Spasonova, L., Shakhnovskiy, A., & Kvitka, O. (2026). Doslidzhennia protsesiv ochyshchennia vody dioksydom khloru: 1. planuvannia eksperymentiv. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 363(2), 237-243. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-32> Sadiq R., Rodriguez M.J. Disinfection by-products (DBPs) in drinking water and predictive models for their occurrence: a review. *Science of the Total Environment*. 2004. 321. pp. 21–46.
2. Kovalchuk L.Y., Petrenko N.F., Mokiienko A.V. Shchodo utvorennia tryhalometaniv pry ochyshchenni vody poverkhnevnykh vodoym Ukrainyko Prydunavya: vybir oksyluyvacha. *Visnyk Odeskoyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury*. 2015. 59. pp. 267-272. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vodaba\\_2015\\_59\\_41](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vodaba_2015_59_41) [in Ukrainian].
3. Mokiienko A. (2025). *Dioksyd khloru*: Monohrafiia. V. 1. Khimiia. 611 p. URL: [https://eprints.ua.edu.ua/id/eprint/9664/1/Dioksyd\\_hloru\\_T.1.pdf](https://eprints.ua.edu.ua/id/eprint/9664/1/Dioksyd_hloru_T.1.pdf) [in Ukrainian].
4. Mokiienko A. (2025). *Dioksyd khloru*: Monohrafiia. V. 2. Mikrobiolohiya. 415 p. URL: <https://eprints.ua.edu.ua/id/eprint/10270/> [in Ukrainian].
5. DSanPiN 2.2.4-171-10 "Hihienichni vymohy do vody pytnoi, pryznachenoj 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].
6. *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>
7. 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>
8. *Pro zatverdzhennia Derzhavnykh sanitarnykh norm ta pravyl "Hihienichni vymohy do vody pytnoi, pryznachenoj dlia spozhyvannia liudynoiu" 2.2.4-171-10*. Nakaz Ministerstva oshorony zdorovia Ukrainy vid 12 travnya 2010 roku № 400. Zareyestrovano v Ministerstvi yustytysiy Ukrainy 1 lypnya 2010 r. za № 452/17747. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text> [in Ukrainian].
9. 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
10. 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
11. 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
12. 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.
13. *Вступ до планування оптимального експерименту*: навч. посібн. / Г.О. Статюха, Д.М. Складанний, О.С. Бондаренко. К.: ІВЦ «Політехніка»/ 117 с. [in Ukrainian].
14. 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.
15. 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.
16. Danylkovych A., Lishchuk V., Shakhnovsky A. Improvement of structure determining qualitative characteristics of hydrophobized velour. *Vlákna a textile*. 2020. 27(3). pp. 41-48. URL: [http://vat.ft.tul.cz/2020/3/VaT\\_2020\\_3\\_8.pdf](http://vat.ft.tul.cz/2020/3/VaT_2020_3_8.pdf)
17. Quero-Jiménez P. C., Hernández-Ramírez A., et.al. Use of experimental design for screening and optimization of variables influencing photocatalytic degradation of pollutants in aqueous media: A review of chemometrics tools. *Chemical Engineering Research and Design*. 2025. V. 220. pp. 270-291. DOI: 10.1016/j.cherd.2025.07.009.