https://doi.org/10.32402/hygiene2024.74.029 УДК 614.777:628.16:546.134

# ГІГІЄНІЧНА ОЦІНКА ОСНОВНИХ ПІДХОДІВ ДО ВИКОРИСТАННЯ ДІОКСИДУ ХЛОРУ НА ВОДОПРОВІДНИХ СТАНЦІЯХ УКРАЇНИ З ПОВЕРХНЕВИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ПИТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ

Зоріна О.В., Галагуз В.А., Тихоненко М.О.

ДУ «Інститут громадського здоров'я ім. О.М. Марзєєва НАМН України», м. Київ, Україна e-mail: wateramnu@ukr.net

Зоріна О.В. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1557-8521 Галагуз В.А. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-3282-6937 Тихоненко М.О. ORCID: https://orcid.org/0009-0006-0921-500X

**Мета.** Провести гігієнічну оцінку основних підходів до використання діоксиду хлору в технологіях водопідготовки водопровідних станцій України з поверхневими джерелами питного водопостачання з метою виявлення та мінімізації потенційних ризиків для здоров'я людини.

Матеріали і методи досліджень. Проведено аналіз водоочисних технологій, що використовуються на водопровідних станціях України для обробки питної води, виготовленої з поверхневих джерел питного водопостачання. Проаналізовано результати досліджень якості води за пріоритетними санітарно-хімічними та мікробіологічними показниками в місцях питних водозаборів і питної, а також дози реагентів, що використовувались для обробки питної води протягом 2021-2023 рр. Проведено порівняльний аналіз вимог до якості питної води в разі її обробки діоксидом хлору Директиви 2020/2184/ЄС щодо якості води, призначеної для споживання людиною, національних нормативно-правових актів 22-ох країн ЄС та ДСанПіН 2.2.4-171-10 України щодо якості питної води. Для оцінки ризиків для здоров'я використовували прийняті в міжнародній практиці методи. Методи дослідження: бібліографічний, аналітичний, порівняльної оцінки, санітарно-хімічні, мікробіологічні, гігієнічної оцінки, оцінки ризиків, математичні та статистичні.

Результати досліджень та їх обговорення. Натепер в умовах соціально-політичної кризи в Україні діоксид хлору використовується на окремих водопровідних станціях України з метою: додаткового заключного знезараження; додаткової первинної та вторинної обробки разом з хлоруванням; первинної обробки води перед її надходженням на водопровідну станцію; повної заміни хлор-газу на діоксид хлору. Лише на водопровідних станціях Дніпровській міста Києва та міста Горішні Плавні Полтавської області діоксид хлору використовують протягом року в постійному режимі для знезараження сирої води з поверхневого джерела питного водопостачання (річки Дніпро). На Дніпровській водопровідній станції міста Києва застосування діоксиду хлору призвело до найбільших змін технологічного процесу виробництва питної води та дозволило забезпечити її епідемічну безпечність, знизити кількість небезпечних, при застосуванні реагентів, та вміст побічних продуктів хлорування та озонування, а також забезпечити вміст токсичних хлоритів на рівні ≤0,7 мг/л, що відповідає допустимому ризику для здоров'я людини (≤1,0). За результатами математичного моделювання процесу утворення хлоритів в питній воді визначено, що ризик утворення хлоритів у питній воді розподільної мережі Дніпровської водопровідної станції міста Києва в понаднормативних концентраціях буде на рівні ≤1,0, якщо сумарна доза діоксиду хлору буде на рівні ≤3,5 мг/л, а гігієнічний норматив хлоритів – ≤0,2 мг/л. Якщо гігіснічний норматив хлоритів прийняти на рівні ≤0,7 мг/л, то ризик утворення понаднормативного вмісту хлоритів в питній воді розподільної мережі знизиться у 2,5 рази. Чинні гігієнічні вимоги України щодо вмісту хлоритів (гігієнічний норматив  $\leq 0,2 \text{ мг/л}$ ) та діоксиду хлору (гігієнічний норматив  $\geq 0,1 \text{ мг/л}$ ) у питній воді розподільної мережі найжорсткіші порівняно з вимогами країн ЄС та потребують перегляду.

Висновки. Діоксид хлору використовують на водопровідних станціях України як малої (15-25 тис. м<sup>3</sup>/добу), так і великої потужності (100-200 тис. м<sup>3</sup>/добу), найчастіше в якості додаткового або основного методу знезараження питної води, виготовленої з поверхневої, у дискретному або постійному режимі. Ризик утворення понаднормативного вмісту хлоритів в питній воді розподільної мережі залежить від сумарної дози діоксиду хлору та ефективності заходів з їх мінімізації. Технології виробництва питної води з використанням діоксиду хлору на водопровідної станції м. Горішні Плавні Полтавської області, що передбачає використання діоксиду хлору для обробки сирої води перед її надходженням на водопровідну станцію, а також на Дніпровській водопровідній станції міста Києва, що передбачає заміну хлор-газу з преамонізацією на діоксид хлору з хлоридом двовалентного заліза, дозволяють оптимізувати традиційний технологічний процес та поліпшити якість питної води за відсутності потенційних ризиків для здоров'я.

Ключові слова. Питна вода, знезараження, хлорити, ризик для здоров'я.

# HYGIENIC ASSESSMENT OF THE MAIN APPROACHES TO THE USE OF CHLORINE DIOXIDE AT THE WATER SUPPLY PLANTS OF UKRAINE WITH SURFACE SOURCE OF DRINKING WATER SUPPLY

## O.V. Zorina, V.A. Galaguz, M.O. Tikhonenko

## SI «O.M. Marzieiev Institute for Public Health of the NAMS of Ukraine», Kyiv, Ukraine

**The purpose of the work.** Conduct a hygienic assessment of the main approaches to the use of chlorine dioxide in the water treatment technologies of water supply stations of Ukraine with surface sources of drinking water supply in order to identify and minimize potential risks to human health.

Materials and methods of research. The analysis of water purification technologies used at water supply stations in Ukraine for the treatment of drinking water produced from surface sources of drinking water supply was carried out. The results of water quality studies on priority sanitary-chemical and microbiological indicators in the places of drinking water intakes and drinking water, as well as the doses of reagents used for the treatment of drinking water, during 2021-2023. A comparative analysis of the requirements for the quality of drinking water in the case of its treatment with chlorine dioxide, Directive 2020/2184/EU on the quality of water intended for human consumption, national regulations of 22 EU countries and SSRN 2.2.4-171-10 of Ukraine regarding the quality of drinking water. Methods adopted in international practice were used to assess health risks. Research methods: bibliographic, analytical, comparative assessment, sanitary-chemical, microbiological, hygienic assessment, risk assessment, mathematical and statistical.

**Research results and their discussion.** Currently, in the context of the social and political crisis in Ukraine, chlorine dioxide is used at separate water stations in Ukraine with the purpose of: additional final disinfection; additional primary and secondary treatment along with chlorination; primary treatment of water before it enters the water supply station; complete replacement of chlorine gas with chlorine dioxide. Only at the water stations of the Dnipro city of Kyiv and Horishni Plavni city of the Poltava region, chlorine dioxide is used continuously throughout the year for the disinfection of raw water from the surface source of drinking water supply (Dnipro). At the Dnipro water station in Kyiv, the use of chlorine dioxide led to the greatest changes in the technological process of drinking water production and made it possible to ensure its epidemic safety, reduce the amount of dangerous reagents and the content of  $\leq 0.7 \text{ mg/l}$ , which

corresponds to the permissible human health risk ( $\leq 1.0$ ). According to the results of mathematical modeling of the process of formation of chlorites in drinking water, it was determined that the risk of formation of chlorites in the drinking water of the distribution network of the Dnipro water station of the city of Kyiv in excess concentrations will be at the level of  $\leq 1.0$ , if the total dose of chlorine dioxide is at the level of  $\leq 3.5$  mg/l, and the hygienic norm of chlorites is  $\leq 0.2$  mg/l. If the hygienic norm of chlorites is adopted at the level of  $\leq 0.7$  mg/l, then the risk of formation of excessive chlorite content in the drinking water of the distribution network will decrease by 2.5 times. The current hygienic requirements of Ukraine regarding the content of chlorites (hygienic standard  $\leq 0.2$  mg/l) and chlorine dioxide (hygienic standard  $\geq 0.1$  mg/l) in drinking water of the distribution network are the strictest compared to the requirements of EU countries and need to be revised.

**Conclusions.** Chlorine dioxide is used in the Ukrainian Armed Forces as a small (15-25 thousand  $m^3/day$ ) and large capacity (100-200 thousand  $m^3/day$ ), most often as an additional or main method of disinfecting drinking water produced from surface, discrete or continuous mode. The risk of excessive chlorite content in the drinking water of the distribution network depends on the total dose of chlorine dioxide and the effectiveness of measures to minimize it. Technologies for the production of drinking water using chlorine dioxide at the water supply station in the city of Horishni Plavni, Poltava region, which involves the use of chlorine dioxide for the treatment of raw water before it enters the water supply station, as well as at the Dnipro water station in the city of Kyiv, which involves the replacement of chlorine gas with preammonization to chlorine dioxide with ferric chloride, allow to optimize the traditional technological process and improve the quality of drinking water in the absence of potential health risks.

Keywords. Drinking water, disinfection, chlorites, health risk.

Наразі в більшості країн ЄС з метою знезараження водопровідну питну воду хлорують (хлором, гіпохлоритом натрію), використовуючи цей метод в якості основного або в поєднанні з іншими методами (озоном, УФ-випромінюванням, перманганатом калію, ультрафільтрацією), альтернативою є хлорамінування та обробка діоксидом хлору [1]. Вперше в світі діоксид хлору для знезараження питної води застосували в Німеччині у 1894 р. Нині його використовують для обробки води муніципального водопостачання у 13-ти країнах ЄС – Австрії, Німеччині, Фінляндії, Франції, Італії, Іспанії, Люксембурзі, Греції, Португалії, Угорщині, Польщі, Румунії, Словенії [2], на водопровідних станціях (ВС) США та України [3,4].

Діоксид хлору частіше виготовляють на місці використання за допомогою генераторів, тому що він нестабільний при збереженні та транспортуванні, однак розчин його можна отримати шляхом змішування хлориту або хлорату натрію з концентрованими кислотами (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> тощо) та/або сильними окиснювачами (Cl<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, NaOCl тощо). У країнах, що розвиваються, таких як Китай, метод змішування хлорату натрію з концентрованою соляною кислотою популярніший, при цьому розчин діоксиду хлору можуть змішувати з хлором та використовувати відповідний змішаний окиснювач сумішевий окислювач діоксиду хлору (ClO<sub>2</sub>) і хлору (Cl<sub>2</sub>) [5]. Відомо, що порівняно з хлором діоксид хлору має багато переваг: вища окиснювана, бактерицидна, віруліцидна і протозооцидна дія; триваліший пролонгований бактерицидний ефект; ефективніший у боротьбі з біоплівками; запобігає росту водоростей; не сприяє утворенню тригалогенметанів, хлорфенолів, хлорамінів, погіршенню органолептичних показників води; активність практично не залежить від значення водневого показника води; потребує меншого часу контакту з водою. За даними ВООЗ та наукової літератури [3,5] діоксид хлору сам по собі не шкодить здоров'ю людини, а нейтралізується слиною та шлунковим соком. А втім діоксид хлору має і недоліки: у концентраціях вище 30% вибухонебезпечний; високі витрати на встановлення та експлуатацію; нестабільний і має бути підготовлений у момент використання; у питній воді утворюються побічні продукти – помірно-токсичні хлорати та токсичні хлорити. В разі понаднормативного вмісту хлоритів в питній воді слід застосовувати заходи з їх мінімізації [6]. Діоксид хлору ефективно інактивує мікроорганізми у широкому діапазоні рН 3-9, проте високі концентрації загальних завислих речовин та органічних забруднювачів у воді значно знижують ефективність знезараження [7].

Італійські науковці акцентують свою увагу на тому, що у разі використання діоксиду хлору фахівці кожної ВС повинні протягом перших років його використання розробляти оптимальні умови для безпечного та ефективного використання цього реагенту та накопичувати свій власний досвід для здійснення оптимального технологічного процесу [8].

Таким чином, нині є актуальним проаналізувати особливості використання діоксиду хлору на ВС України та розширити знання щодо його властивостей у разі використання в практиці питного водопостачання для обробки поверхневої води з високим вмістом органічних речовин з метою захисту здоров'я людей.

**Мета роботи.** Провести гігієнічну оцінку основних підходів до використання діоксиду хлору в технологіях водопідготовки ВС України з поверхневими джерелами питного водопостачання з метою виявлення та мінімізації потенційних ризиків для здоров'я людини.

Матеріали та методи досліджень. Проведена робота щодо встановлення переліку водоканалів України, де протягом останніх років використовується технологія обробки питної води діоксидом хлору. Були проаналізовані технологічні регламенти з виробництва водопровідної питної води та офіційні сайти водоканалів, фактична потужність яких – 15-25 тис. та 100-200 тис. м<sup>3</sup>/добу. Визначення якості води в місці питного водозабору та резервуарі чистої води (РЧВ) КП «Виробниче управління водопровідно-каналізаційного господарства» Горишньоплавнівської міської ради Кременчуцького району Полтавської області» (м. Горішні Плавні Полтавської області) проводилось хімлабораторією цього водоканалу два рази на місяць протягом 2021-2023 рр. за пріоритетними санітарно-хімічними та мікробіологічними показниками. Визначення якості води в місці питного водозабору та питної в РЧВ та розподільній мережі Дніпровської BC м. Києва проводилось хімлабораторією цього водоканалу за санітарно-хімічними та мікробіологічними показниками один раз на добу протягом 2021р. – (січень-квітень) 2023 р. Встановлювалися також раз на добу дози діоксиду хлору та інших реагентів для обробки води. Показники безпечності та якості питної води визначали стандартними методами, що прийняті в лабораторній практиці.

З погляду розуміння ризиків при вживанні питної води, обробленої діоксидом хлору, та управління ними проведено порівняльний аналіз вимог Директиви 2020/2184/ЄС [9] та національних нормативно-правових актів 22-ох країн ЄС (42-ох документів, що набували чинності протягом 2001-2023 рр.) щодо якості питної води та порядку її моніторингу.

Для оцінки ризиків для здоров'я використовували прийняті в міжнародній практиці методи. Зокрема, рекомендований ВООЗ напівкількісний метод, при цьому оцінювались: рівень наслідків (за 4-бальною шкалою – незначний або немає, маленький, середній, великий); рівень ймовірності виникнення небезпеки (за 5-ти бальною шкалою); рівень ризику (за 3-ох бальною системою). Також використовували методику оцінки неканцерогенних ризиків відповідно до Керівництва International Agency for Research on Cancer [10]. Коефіцієнт небезпеки визначали за формулою:

$$HQ = AD / RfD$$
,

де: HQ – коефіцієнт небезпеки; AD – середньодобова доза, мг/кг; RfD – референтна (безпечна) доза, мг/кг.

Rfd для хлориту було отримано шляхом ділення NOAEL 3 мг/кг на день на коефіцієнт невизначеності 100, що становить 0,03 мг/кг/день [11]. Розрахунок середньодобової дози шкідливої речовини (мг/кг), яка може надходити до організму з питною водою, здійснювався відповідно до вимог Методичних рекомендацій [12] для дорослої людини, без урахування вікових особливостей, за формулою:

## $CДД = C \times O\Pi / MT,$

де: С – середня арифметична концентрація токсичної речовини у воді (мг/л); ОП – об'єм питної води, що споживається за добу (3 л); МТ – вага тіла (70 кг).

Методи дослідження: бібліографічний, аналітичний, порівняльної оцінки, гігієнічної оцінки, оцінки ризиків, математичні та статистичні в програмному середовищі Matlab 2018, MS Office Excel, пакету «Statistica 8.0», визначали середні арифметичні значення (М) та їх похибки (m) [13].

Результати та обговорення. Натепер в умовах соціально-політичної кризи в Україні діоксид хлору використовується на окремих ВС України з метою: додаткового заключного знезараження водопровідної води ВС «ДНІСТЕР» (мм. Південне та Чорноморськ Одеської області); додаткової первинної та вторинної обробки (за необхідності на підставі мікробіологічних аналізів) разом з хлоруванням водопровідної води м. Жовті Води Дніпропетровської області КП «Жовтоводський водоканал», що виготовляється з води водосховища «Іскрівське» річки Інгулець; первинної обробки води Дніпровської затоки «Річище» перед її надходженням на ВС КП «Виробниче управління водопровідно-каналізаційного господарства» Горішньоплавнівської міської ради Кременчуцького району Полтавської області» (м. Горішні Плавні Полтавської області); повної заміни хлор-газу на діоксид хлору для первинної обробки води річки Дніпро та заключного знезараження питної води Дніпровської ВС м. Києва.

Отже, лише на Дніпровській ВС м. Києва та ВС м. Горішні Плавні Полтавської області діоксид хлору використовують протягом року в постійному режимі для знезараження води річки Дніпро, що характеризується великим вмістом органічних речовин. На інших станціях діоксид хлору використовується лише як додатковий метод знезараження вже очищеної питної води або епізодично за необхідності. На ВС дози діоксиду хлору, що використовуються для додаткового знезараження (мм. Південне та Чорноморськ Одеської області, м. Жовті Води Дніпропетровської області), відповідають мінімально діючим [14] – 0,15-0,3 мг/л, при цьому вміст хлоритів в питній воді відсутній або суттєво нижчий за гігієнічний норматив ≤0,2 мг/л згідно з ДСанПіН 2.2.4-171-10 [15].

Гігієнічна оцінка застосування діоксиду хлору на ВС м. Горішні Плавні Полтавської області малої потужності (близько 15 тис. м<sup>3</sup>/добу) та Дніпровській ВС м. Києва великої потужності (близько 200 тис. м<sup>3</sup>/добу), де на відміну від інших протягом року в постійному режимі використовують діоксид хлору для обробки питної води, показала наступне.

Якість поверхневої води в місці питного водозабору м. Горішні Плавні Полтавської області в 2021 р. згідно з ДСТУ 4808:2007 [16] за показниками забарвленість (60,00±3,54 градусів) та перманганатна окиснюваність (ПО) (11,76±0,37 мгО/л), що характеризують вміст органічних речовин, відповідала 2-й та 3-й категорії якості відповідно. Після обробки сирої води діоксидом хлору (середньорічна доза – 0,54±0,72 мг/л) вода проходила наступні етапи очищення: обробку у вихрових змішувачах (первинне хлорування хлором рідким; коагуляція гідроксихлоридом алюмінію), відстоювання в горизонтальних відстійниках з камерами утворення пластівців, фільтрацію на швидких фільтрах, заключне хлорування. Після відповідної обробки вміст ПО в питній воді знизився у майже 2 рази, середньорічна концентрація хлоритів була суттєво нижчою за гігієнічний норматив ( $\leq 0,2$  мг/л) – 0,11±0,01 мг/л (від 0,04 мг/л до 0,17 мг/л). Не виявлено залежності концентрації хлоритів в питній воді від дози діоксиду хлору ймовірно через зниження хлоритів під час подальшої обробки питної води на ВС [12].

У 2020 р. на Дніпровській ВС м. Києва технологію обробки води, що передбачала подвійне хлорування з преамонізацією сирої води та за необхідності – додаткове озонування питної води перед РЧВ, було замінено на обробку діоксидом хлору. Проведені нами дослідження на базі Дніпровської ВС м. Києва [14] дозволили з'ясувати, що величина ризику для здоров'я населення при вживанні питної води, обробленої діоксидом хлору, залежить від

варіанту її реагентної обробки. Застосування діоксиду хлору з подальшою обробкою хлоридом двохвалентного заліза, сульфатом алюмінію, аніонним флокулянтом на водопровідній станції з класичним набором водоочисних споруд (змішувач з вертикальним рухом води, горизонтальний відстійник з вбудованою камерою реакції, швидкий фільтр) та гіпохлоритом натрію (в теплий період року на насосній станції ІІІ підйому дозами 0,6-3,0 мг/л) дозволяє мінімізувати відповідний ризик (табл. 1).

Таблиця 1. Рівень ризику (в балах) при використанні діоксиду хлору в технології очищення питної води на Дніпровській ВС м. Києва.

Чинник ризику	Варіанти реагентної обробки		
	1-й	2-й	3-й
	реагенти, що використовуються		
	СlO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> + флок.	ClO <sub>2</sub> + FeCl <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> + флок.	ClO <sub>2</sub> + FeCl <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> + флок. + NaClO
Хлорити	3	2	2
Мікробіологічні показники	2	2	1

Примітки: 1 – низький ризик, що не вимагає жодних заходів або лише незначних коригувань у роботі; 2 – середній ризик, залежно від ситуації може означати необхідність серйозної корекції операції, а також простого регулярного контролю за станом; 3 – високий ризик, вимагає термінового рішення; ClO<sub>2</sub> – діоксид хлору; FeCl<sub>2</sub> – коагулянт (хлорид двохвалентного заліза); Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> – коагулянт (сульфат алюмінію); флок. – флокулянт на основі поліакриламіду; NaClO – гіпохлорит натрію, що використовується на насосній станції III підйому в теплий період року.

Отже, для мінімізації вмісту хлоритів в питній воді Дніпровської ВС м. Києва в якості другого коагулянту застосовується хлорид двохвалентного заліза (FeCl<sub>2</sub>), дозу якого приймають, орієнтуючись на вміст хлоритів в питній воді розподільної мережі, що майже весь час спостережень у 2021 р. підтримували на рівні  $\leq 0.7$  мг/л, середній вміст хлоритів був на рівні –  $0.2\pm0.01$  мг/л, що відповідає допустимому рівню ризику для здоров'я людини ( $\leq 1.0$ ).

Якість поверхневої води в місці питного водозабору Дніпровської ВС м. Києва в 2021 р. відповідала «прийнятній якості» (2 та 3 класу якості), а в наступні два роки погіршилась, наприклад, за хімічним споживанням кисню (40,97 ± 2,14 мг/л) до «небажаної якості» (4 класу якості) за ДСТУ 4808:2007 [16]. При цьому виявлено статистично достовірні збільшення первинної та вторинної дози діоксиду хлору (з 1,21±0 до 1,71±0 мг/л та 0,18±0 до 0,24±0 мг/л відповідно) у 1,4 та 1,3 раза (p < 0,05) та зменшення дози хлориду двохвалентного заліза (21,68±0,24 до 11,60±1,27 мг/л) у 1,9 раза (p < 0,05) у січні-квітні 2023 р., ніж у відповідний період 2021 р. (рис. 1 а).

Співвідношення середньомісячної дози хлориду двохвалентного заліза та первинної дози діоксиду хлору (FeCl<sub>2</sub> : ClO<sub>2</sub>) протягом всього часу спостереження – від 16 (2021 р.) до 7 (2023 р.). Зміни доз реагентів відбувалися передусім через погіршення якості води річки, зміни вимог до якості питної води у період воєнного стану (норматив хлоритів у 2021 р. був  $\leq 0,2$  мг/л, а став у 2022 р.  $\leq 0,7$  мг/л), а також, ймовірно, через гальмування логістики під час ведення бойових дій на території України. Через зменшення співвідношення дози діоксиду хлору до дози хлориду двохвалентного заліза вміст хлоритів протягом 2022 та 2023 рр. був більшим, ніж в 2021 р.



Рисунок 1. а) дози діоксиду хлору ([ClO2]) для первинної обробки води та частота їх використання; б) концентрації хлоритів у воді розподільної мережі та кількість їх виявлення.

На рис. 1 б можна бачити, що концентрації хлоритів, у воді розподільної мережі, як і дози діоксиду хлору, були найбільші в 2022 р. Зокрема, вміст хлоритів в третьому кварталі 2022 р. був на рівні –  $0,62\pm0,03$  мг/л, середньорічний вміст –  $0,44\pm0,03$  мг/л. Проведені нами розрахунки ризику для здоров'я показали наступне. Якщо вміст хлоритів в питній воді на рівні  $\leq 0,7$  мг/л, то за рівень ризику для здоров'я людини від вживання такої питної води є допустимим ( $\leq 1,0$ ).

Аналіз даних утворення хлоритів у воді розподільної мережі Дніпровської ВС м. Києва протягом 2021-2023 рр. в залежності від сумарної дози діоксиду хлору показує прямування функції до експоненційного закону (рис. 2) [17].



Рисунок 2. Залежність концентрації хлоритів у воді розподільної мережі від сумарної дози діоксиду хлору.

Так, для функції апроксимації:

$$H = ae^{\lambda D}, \tag{1}$$

де:

*H* – концентрація хлоритів в воді у споживача (*мг/л*);

*D* – сумарна доза ДХ, коефіцієнти функції апроксимації (*a*, λ) даних спостережень становили:

- для 2021 р. *a*=0,086, λ=0,371 (*R*<sup>2</sup>=0,37);
- для 2022 р. *a*=0,171 , λ=0,410 (*R*<sup>2</sup>=0,42);
- для 2021-2023 pp. *a*=0,121, λ=0,416 (*R*<sup>2</sup>=0,30).

Враховуючи отримані вище дані, ми прийшли до наступного висновку. Якщо сумарна доза діоксиду хлору буде на рівні 3,5 мг/л, а гігієнічний норматив хлоритів  $\leq 0,2$  мг/л, то ризик утворення понаднормативного вмісту хлоритів в питній воді розподільної мережі буде на рівні 1. Якщо сумарна доза діоксиду хлору буде на рівні 3,5 мг/л, а гігієнічний норматив хлоритів  $\leq 0,7$  мг/л, то ризик утворення понаднормативного вмісту хлору буде на рівні 3,5 мг/л, а гігієнічний норматив хлоритів  $\leq 0,7$  мг/л, то ризик утворення понаднормативного вмісту хлоритів в питній воді розподільної мережі знижується у 2,5 рази (рис. 3).





У питній воді РЧВ середній вміст діоксиду хлору за весь час спостережень був на рівні – 0,16±0,01 мг/л (від 0,1 до 0,33 мг/л), а в мережі споживачів – 0,08±0 мг/л (від 0,03 до 0,11 мг/л), що свідчить про зниження концентрації діоксиду хлору в 2 рази протягом транспортування трубопроводами довжиною 2 км, тобто нестабільність його вмісту. Проведений аналіз вимог Директиви 2020/2184/ЄС [9] та нормативно-правових актів 22-ох країн ЄС показав, що вміст діоксиду хлору у воді розподільної мережі контролюють лише в Словаччині (гігієнічний норматив  $\leq 0,2$  мг/л) та Україні (гігієнічний норматив  $\geq 0,1$  мг/л). Норматив діоксиду хлору  $\geq 0,1$  мг/л не слід поширювати на якість питної води розподільної мережі, його приймають для води після 30 хвилин її контакту з діоксидом хлору.

Використання діоксиду хлору в технологічному процесі виробництва водопровідної питної води повинно здійснюватися на основі підходів, розроблених індивідуально для кожної ВС.

#### Висновки

- 1. Діоксид хлору використовують на водопровідних станціях України як малої (15-25 тис. м<sup>3</sup>/добу), так і великої потужності (100-200 тис. м<sup>3</sup>/добу), найчастіше в якості додаткового або основного методу знезараження питної води, виготовленої з поверхневої, у дискретному або постійному режимі. Лише на водопровідних станціях мм. Горішні Плавні Полтавської області та Києва діоксид хлору використовується у постійному режимі для обробки сирої води водопровідної станції з поверхневим джерелом питного водопостачання (р. Дніпро).
- 2. Технології виробництва питної води з використанням діоксиду хлору на водопровідній станції м. Горішні Плавні Полтавської області, що передбачає використання діоксиду хлору для обробки сирої води перед її надходженням на водопровідну станцію, а також на Дніпровській водопровідній станції м. Києва, що передбачає заміну хлор-газу з преамонізацією на діоксид хлору з хлоридом двохвалентного заліза, дозволяють оптимізувати традиційний технологічний процес та поліпшити якість питної води. За відповідних умов вміст хлоритів в питній воді відповідає вимогам в: м. Горішні Плавні ДСанПіН 2.2.4-171-10 [15] (гігієнічний норматив ≤0,2 мг/л); м. Київ Директиви 2020/2184/СС [9] (гігієнічний норматив ≤0,7 мг/л). Вміст хлоритів у водопровідній питній воді зазначених міст відповідає дозволеному рівню ризику для здоров'я людини (≤1).
- 3. Діоксид хлору у всіх встановлених випадках його використання в процесі водоочищення на водопровідних станціях України дозволяє підвищити епідемічну безпечність питної води за відсутності потенційних ризиків для здоров'я. Чинні гігієнічні вимоги України щодо вмісту хлоритів (гігієнічний норматив ≤0,2 мг/л) та діоксиду хлору (гігієнічний норматив ≥0,1 мг/л) в питній воді розподільної мережі найжорсткіші порівняно з вимогами країн ЄС та потребують перегляду.
- 4. Математичне моделювання процесу утворення хлоритів в питній воді, виготовленій з води річки Дніпро на Дніпровській водопровідній станції міста Києва, дозволило встановити, що згідно з вимогам ДСанПіН 2.2.4-171-10 [15] (гігієнічний норматив хлоритів ≤0,2 мг/л) ризик утворення понаднормативного вмісту хлоритів в питній воді розподільної мережі Дніпровської водопровідної станції міста Києва буде прийнятним (≤1) в разі сумарної дози діоксиду хлору на рівні не більше 3,5 мг/л. Ризик утворення понаднормативного вмісту хлоритів в питній вода розподільної мережі залежить від сумарної дози діоксиду хлору та ефективності заходів з їх мінімізації.
- 5. Зміна технологічного процесу виробництва питної води через впровадження нової технології з використанням діоксиду хлору може призводити до суттєвих змін ряду технологічних операцій, необхідних заходів їх безпеки, порядку контролю технологічного процесу та виробничого контролю якості питної води.

#### Внески авторів:

Зоріна О.В. – ідея статті, методологія, математична обробка даних, формальний аналіз, написання тексту;

Галагуз В.А. – збір, математична обробка даних, редагування тексту;

Тихоненко М.О. – аналіз наукової літератури.

Фінансування. Дослідження не має зовнішніх джерел фінансування. Конфлікт інтересів. Відсутній.

#### REFERENCES

1. Evlampidou I, Font-Ribera L, Rojas-Rueda D, et al. Trihalomethanes in Drinking Water and Bladder Cancer Burden in the European Union. Environmental Health Perspectives. 2020;128(1):017001-1.

doi: https://doi.org/10.1289/EHP4495

2. Novytskyi DYu, Kostyuk VA, Kobylianskyi VYa. [Chlorine dioxide in the aspect of microbiological safety of tap water]. Science Review. 2019;4(21):9-14. Ukrainian.

doi: https://doi.org/10.31435/rsglobal sr/31052019/6487

- 3. Özdemir K. Chlorine and chlorine dioxide oxidation of natural organic matter in water treatment plants. Environment Protection Engineering. 2020;46(4):87-97. doi: https://doi.org/10.37190/epe200407
- 4. Mesanagrenou M. Water chlorination as a metod of disinfection. 2020. Available from: https://www.zythopedia.eu/50
- Zhong Yu, Gan W, Du Ye, Huang H, Wu Q, Xiang YiYi, Shang C, Yang X. Disinfection byproducts and their toxicity in wastewater effluents treated by the mixing oxidant of ClO<sub>2</sub>/Cl<sub>2</sub>. Water Research. 2019;162:471-81.

doi: https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.07.012

- 6. Mokienko AV. [Water disinfection: hygienic and medical-ecological aspects]. Odesa. 2022. 288 p. Ukrainian.
- Ayyildiz O, Ileri B, Sanik S. Impacts of water organic load on chlorine dioxide disinfection efficacy. Journal of Hazardous Materials. 2009;168(2-3):1092-7. doi: https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.153
- 8. Lasocka-Gomuła I, Świetlik J. Impact of the modernized technology on the quality of water supplied to the extended distribution system of the city of Poznań. Appl Water Sci. 2022;12:109.

doi: https://doi.org/10.1007/s13201-022-01658-8

- 9. Directive (EU) 2020/2184 on the quality of water intended for human consumption (recast). OJ L 435; 23.12.2020:1-62. Available from: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/BG/TXT/?uri=CELEX:32020L2184#
- 10. Toxicological review of chlorine dioxide and chlorite. In Support of summary information on the integrated risk information system. EPA. 2000:49. Available from: https://iris.epa.gov/static/pdfs/0496tr.pdf
- 11. [Assessment of the carcinogenic risk to public health from the consumption of chlorinated drinking water. Methodical instructions. Order of the Ministry of Health of Ukraine dated October 21, 2005 No. 545]. Ukrainian. Available from: https://mozdocs.kiev.ua/view.php?id=4448
- 12. Mokienko AV, Petrenko NF, Gozhenko AI. [Disinfection of water. Hygienic and medicalecological aspects. Chlorine dioxide]. Odesa: TES, 2012;2. 605 p. Russian.
- 13. Antomonov MYu. [Mathematical processing and analysis of medical and biological data]. Kyiv: MYCz "Medinform". 2018. 579 p. Russian.
- 14. Zorina OV, Surmasheva OV, Polka OO, Mavrykin EO. [Risk assessment when consuming drinking water treated with chlorine dioxide and risk management in EU countries and Ukraine to protect public health]. Medicni perspektivi. 2023;28(4):181-9. Ukrainian. doi: https://doi.org/10.26641/2307-0404.2023.4.294226
- 15. [SSRN 2.2.4-171-10. Hygienic Requirements to Drinking Water for Human Consumption]. Kyiv; 2010:99-129. Ukrainian.
- 16. [SSTU 4808:2007. Sources of centralized drinking water supply. Hygienic and ecological requirements for water quality and selection rules]. Kyiv: Derzhspozhivstandard of Ukraine. 2007. 39 p. Ukrainian.
- Mavrykin E, Zorina O. [Analysis and mathematical modeling of chlorite formation and content in water treated with chlorine dioxide in the drinking water supply system]. Problems of Water Supply, Severage and Hydraulics. 2023;(44):47-62. Ukrainian. doi: https://doi.org/10.32347/2524-0021.2023.44.47-62

Надійшла до редакції / Received: 01.10.2024