

УДК 543.3:546.134

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.4/33>**Спасьонова Л.М.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Бондарчук О.Ю.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Мокієнко А.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

РЕТРОСПЕКТИВНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ КОМБІНОВАНОГО ЗНЕЗАРАЖЕННЯ ПИТНОЇ ВОДИ ДІОКСИДОМ ХЛОРУ ТА ГІПОХЛОРИТОМ НАТРІЮ

У статті розглянуто один із аспектів проблеми якості питної води шляхом впровадження у практику водопідготовки комбінованих методів знезараження води. Мета роботи полягала у ретроспективному аналізі ефективності впровадження технології комбінованого знезараження питної води діоксидом хлору та гіпохлоритом натрію. В аналітичній довідці представлено характеристику технології знезараження води централізованого водопостачання діоксидом хлору. Надано характеристику джерела централізованого водопостачання м. Горішні Плавні. Встановлено, що значення ClO_2 -поглинання річкової води складає $0,75 \pm 0,05$ мг/дм³ і є постійним в інтервалі введених доз діоксиду хлору 1,0 – 2,5 мг/дм³. Показано, що в результаті передокиснення річкової води діоксидом хлору знижуються значення кольоровості, каламутності, перманганатної окиснюваності, нітритів, мангану. Встановлено, що передокиснення річкової води діоксидом хлору, коагуляція, фільтрування, постзнезараження хлором є ефективною технологією при традиційних очисних спорудах і високому вмісті органічних речовин у воді. Застосування діоксиду хлору на стадії передокиснення усуває утворення ТГМ у питній воді, гарантує мікробіологічну якість води, не призводить до перевищення ГДК хлоритів. Показано, що наступне хлорування води частково окиснює хлорити, які утворилися, до діоксиду хлору. Це підвищує ефективність знезараження; забезпечує видалення хлоритів та пролонговану дію у водорозподільчих мережах. Обґрунтовано, що комплексна послідовна дія діоксиду хлору та хлору має гігієнічний (утворюється мінімальна кількість побічних продуктів) та економічний (витрати окиснювачів зменшуються) ефекти. Результати моніторингу вмісту діоксиду хлору та хлоритів свідчать про відповідність якості питної води чинним вимогам щодо вмісту хлоритів у питній воді. Обґрунтовано доцільність подальшого впровадження технології комбінованого застосування діоксиду хлору та хлору (гіпохлориту натрію) для знезараження води.

Ключові слова: питна вода, річкова вода, очищення, знезараження, діоксид хлору, гіпохлорит натрію, комбінування, технологія, ефективність, аналіз.

Постановка проблеми. Забезпечення населення України питною водою є для багатьох регіонів України однією з пріоритетних проблем, розв'язання якої необхідно для збереження здоров'я, поліпшення умов діяльності і підвищення рівня життя населення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для покращення якості води в мережах централізованого питного водопостачання необхідно забезпечити належне фінансування та здійснення в повному обсязі заходів, передбачених державними і регіональними програмами охо-

рони водних ресурсів, розвитку водного господарства та підвищення якості питної води; розроблення та своєчасне впровадження нових та удосконалення існуючих технологій очищення та знезараження води, сучасного обладнання, ефективних реагентів, фільтруючих матеріалів, сорбентів тощо [1, 2].

Використання хімічних окиснювачів для знезараження питної води (здебільшого хлору) призводить до інактивації патогенних мікроорганізмів; дезодорації води, зниження забарвленості, концентрацій органічних та неорганічних сполук

тощо, але негативними факторами цього процесу є утворення побічних продуктів знезараження, поява таких властивостей питної води як токсичність та мутагенна активність, можливість негативного впливу на довкілля (віддалені біологічні ефекти), поява нових резистентних та/чи високовірулентних штамів мікроорганізмів.

Отже, назріла необхідність у новій стратегії знезараження, яка направлена на досягнення рівноваги ризиків зараження водними патогенами і ризиків впливу хімічних дезинфектантів та їх побічних продуктів.

Одним із шляхів розв'язання цієї проблеми є дослідження та подальше впровадження у практику водопідготовки комбінованих методів знезараження води, які є досить перспективними, але найменш впровадженими.

Переваги діоксиду хлору (ClO_2 , ДОХ) над хлором добре відомі. Це, насамперед, широкий спектр біоцидної дії, значно нижчі дози, необхідні для знезараження, тривалий пролонгований ефект тощо [3–5].

Встановлено, що пороговою концентрацією діоксиду хлору за впливом на запах води є $0,45\text{--}0,40$ мг/дм³. Присмак інтенсивністю 1–2 бали виявляється при більш високих концентраціях цієї сполуки у воді.

За рекомендаціями ВООЗ (2017 р.) [6] та Директивою Євросоюзу 2020 р. [7] концентрація діоксиду хлору в питній воді не встановлена у зв'язку з його швидким розпадом, залишкові концентрації хлорит-аніону та хлорат-аніону не повинні перевищувати $0,7$ мг/дм³.

В Україні згідно ДСанПіН 2.2.4-171-10 [8] для питної води гранично-допустима концентрація (ГДК) хлорит-аніонів складає $0,2$ мг/дм³, хлорат-аніони не регламентуються цим документом. У новій редакції даного документу, який знаходиться на затвердженні у МОЗ України, цей норматив приведено у відповідність до вищезазначених вимог, а саме $0,7$ мг/дм³ для хлоритів і хлоратів.

У ДСТУ 7525:2014 [9] норматив вмісту хлорат-іону у воді систем централізованого водопостачання складає $0,7$ мг/дм³.

У 2002 р. виконано гігієнічне обґрунтування застосування діоксиду хлору у технологіях водопідготовки [10]. Проте, цей метод знезараження не набув в Україні широкого впровадження.

Діоксид хлору одержують із хлориту натрію та соляної кислоти (найбільш поширений метод) безпосередньо перед використанням і дозуванням його у воду, призначену для питного водопоста-

чання. Сучасне обладнання з генерації та дозування діоксиду хлору є повністю автоматизованим та безпечним в експлуатації.

Для знезараження води використовують комбіноване застосування ДОХ з іншими окиснювачами – озоном, хлором, що попереджує утворення хлоритів, тригалогенметанів, а також зменшує витрати реагентів.

Експериментально обґрунтовано та впроваджено оптимальну схему послідовного комбінованого застосування діоксиду хлору та хлору (хлор-газу чи гіпохлориту натрію) для знезараження питної води: діоксид хлору вводиться на стадії передокиснення, а хлор – на стадії постзнезараження. В залежності від якості вихідної води ефективна доза діоксиду хлору на стадії передокиснення становить $\leq 1,5$ мг/дм³, що в 3–4 рази менше за дозу хлору, достатню для досягнення подібного ефекту.

За такою схемою вже на стадії передокиснення поліпшуються органолептичні властивості води, запобігається утворення тригалогенметанів, забезпечується первинне знезараження води, у тому числі інактивація вірусів, відбувається часткове окиснення органічних сполук, які видаляють згодом у процесі коагуляційного очищення. Наступне хлорування призводить до окиснення хлоритів, які утворилися, до діоксиду хлору, що підвищує ефективність знезараження та забезпечує бактеріостатичний ефект (пролонговану дію) у водорозподільчих мережах [11].

Метою статті є ретроспективний аналіз ефективності впровадження технології комбінованого знезараження питної води діоксидом хлору та гіпохлоритом натрію.

Виклад основного матеріалу. В травні 2018 року на Комунальному підприємстві «Виробниче управління водопровідно-каналізаційного господарства» Горішньоплавнівської міської ради (м. Горішні Плавні, Кременчуцький район, Полтавська область) впроваджено обладнання із знезараження води діоксидом хлору марки OCD 164 (виробник Grundfos, Німеччина). Продуктивність 350 г ClO_2 /год.

Характеристика джерела централізованого водопостачання м. Горішні Плавні.

Джерелом централізованого водопостачання м. Горішні Плавні є поверхнева водна затока «Речище». Питну воду для міста виробляє КП «Виробниче управління водопровідно-каналізаційного господарства Горішньоплавнівської міської ради». Показники якості річкової води приведено в табл. 1.

Показники якості води затоки «Речище»

Найменування показників	Мінімальне значення	Максимальне значення	Норматив ДСанПіН 2.2.4-171-10
Температура, °С	+ 2,2	+23	-
Кольоровість, град.	40	70	≤ 20
Каламутність, мг/дм ³	0,84	12,0	≤ 1,5
Жорсткість загальна, ммоль/дм ³	3,60	4,30	≤ 7,0
Загальна лужність, ммоль/дм ³	2,30	2,50	-
Залізо загальне, мг/дм ³	0,27	0,45	≤ 0,2
Манган, мг/дм ³	0,5	1,0	≤ 0,05
Перманганатна окиснюваність, мгО/дм ³	9,3	14,0	≤ 5,0

При впровадженні діоксиду хлору на стадії передокиснення в лабораторних умовах визначається діоксидхлоропоглинання річкової води аналогічно хлоропоглинанню – вивчається залежність залишкової концентрації ClO_2 від введеної дози даного окиснювача за 30 хв. контакту. Постійне значення різниці між введеною та залишковою концентраціями є значення діоксидхлоропоглинання.

Значення ClO_2 -поглинання складає $0,75 \pm 0,05$ мг/дм³. Це значення є постійним в інтервалі введених доз діоксиду хлору 1,0–2,5 мг/дм³.

Особливістю визначення ClO_2 -поглинання є можливість дослідження залежності концентрації утворених хлорит- та гіпохлорит-аніонів від введеної дози діоксиду хлору за 30 хв. контакту.

За нашими даними діоксидхлоропоглинання (мг/дм³) у 2,5 рази нижче за хлоропоглинання (мг/дм³) [3, 5, 6, 11–13].

Передокиснення річкової води діоксидом хлору.

Передокиснення природної води застосовується для підвищення ефективності наступних процесів очищення води – коагуляції, відстоювання, фільтрування, знебарвлення, призводить до часткового знезараження води при високих рівнях мікробного забруднення. Залишковий окиснювач витрачається на окиснення різних хімічних речовин, сорбується завислими частинками (або пластівцями) коагулянту, знезаражує поверхню та товщу загрузки фільтрів.

На стадії передокиснення природної води застосовуються дози діоксиду хлору 0,5–5,0 мг/дм³ залежно від показників якості природної води та від її діоксидхлоропоглинання.

Результати передокиснення річкової води різними дозами діоксиду хлору, через 30 хв. контакту наведено в табл. 2.

Як видно із табл. 2, концентрація хлоритів перевищує гігієнічний норматив 0,2 мг/дм³ при дозах ДОХ, що перевищують 0,5 мг/дм³. Наступні

стадії коагуляції та фільтрування дещо знижують їх концентрацію,

В результаті передокиснення річкової води діоксидом хлору знижуються значення таких показників як кольоровість, каламутність (відбувається злипання, укрупнення та осадження завислих речовин), перманганатна окиснюваність, концентрація нітритів. Якщо природна вода містить Mn^{2+} , то буде відбуватися його окиснення до MnO_2 , який випадає в осад та видаляється із води при подальшому фільтруванні.

Комбіноване послідовне застосування окиснювачів (передокиснення річкової води діоксидом хлору та постзnezараження гіпохлоритом натрію).

Отримані результати (табл. 3) свідчать про наступне: постзnezараження гіпохлоритом натрію води, що пройшла передокиснення діоксидом хлору, призводить до часткового окиснення хлоритів, які утворилися, до діоксиду хлору. Це підвищує ефективність знезараження, забезпечує пролонгований бактеріостатичний ефект (пролонговану дію) у водорозподільчих мережах, не призводить до утворення у питній воді хлороформу, покращує органолептичні властивості води.

Передокиснення річкової води ДОХ, коагуляція, фільтрування, пост-зnezараження хлором – найбільш оптимальна схема (серед комбінованих схем очищення) при існуючих очисних спорудах і високому вмісті органічних речовин у воді.

Контроль за якістю питної води при комбінованому використанні діоксиду хлору та гіпохлориту натрію проводиться у відповідності до ДСанПіН 2.2.4-171-10 [8].

Результати моніторингу вмісту діоксиду хлору та хлоритів при експлуатації обладнання.

Концентрації діоксиду хлору та хлоритів перед надходженням води до водорозвідної мережі за 2019–2021 рр. (мін-макс-середні) склали: для ClO_2 –

Результати передокиснення річкової води діоксидом хлору

Найменування показників	Річкова вода	Після передокиснення дозами ДОХ, мг/дм ³				
		0,50	0,75	1,0	1,50	2,00
Кольоровість, град.	46,0	41,0	40,0	39,0	38,0	37,0
Каламутність, НОК	4,00	3,06	2,81	2,78	2,63	2,59
рН	7,85	7,75	7,70	7,70	7,65	7,60
Лужність загальна, ммоль/дм ³	2,50	2,45	2,40	2,40	2,35	2,30
Перманганатна окиснюваність, мгО/дм ³	8,16	7,60	7,68	7,70	7,80	7,84
Нітрити, мг/дм ³	0,077	0,046	0,044	0,041	0,023	0,011
СЮ ₂ , мг/дм ³	<0,05	0,10	0,18	0,30	0,78	1,26
СЮ ⁻ , мг/дм ³	<0,05	0,05	0,20	0,20	0,30	0,30
СЮ ₂ ⁻ , мг/дм ³	<0,05	0,15	0,32	0,40	0,45	0,47
1	2	3	4	5	6	7
ЗМЧ, КОЕ/см ³ при 37 °С	9; 11	6; 4	5; 4	3; 2	2; 1	1; 1
ЗМЧ, КУО/см ³ при 22°С	> 300; > 300	7; 4	5; 3	2; 0	1; 1	1; 0
Загальні колі форми, КОЕ/100 см ³	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено
<i>E. coli</i> , КОЕ/100 см ³	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено
Ентерококи, КОЕ/100 см ³	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено
Патогенні ентеробактерії, наявність в 1 дм ³	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено

Таблиця 3

Результати передокиснення річкової води діоксидом хлору та постзнезараження гіпохлоритом натрію

Найменування показників	Дози ДОХ на стадії передокиснення, мг/дм ³					
	0,5		0,75		1,0	
	Дози хлору, мг/дм ³		Дози хлору, мг/дм ³		Дози хлору, мг/дм ³	
	0	0,5	0	1,0	0	1,0
Кольоровість, град.	41,0	34,0	40,0	33,6	39,0	30,5
Каламутність, НОК	3,06	2,53	2,81	2,38	2,78	2,26
рН	7,75	7,80	7,70	7,75	7,70	7,75
Лужність загальна, ммоль/дм ³	2,45	2,50	2,40	2,50	2,40	2,40
Перманганатна окиснюваність, мгО/дм ³	7,60	7,45	7,70	7,75	7,70	7,75
Нітрити, мг/дм ³	0,046	0,008	0,044	0,007	0,041	0,003
СЮ ₂ , мг/дм ³	0,10	0,20	0,18	0,36	0,26	0,42
СЮ ⁻ , мг/дм ³	0,05	0,33	0,20	0,45	0,20	0,57
СЮ ₂ ⁻ , мг/дм ³	0,15	< 0,05	0,32	< 0,05	0,40	0,10
Хлороформ, мкг/дм ³	< 5,0	< 5,0	< 5,0	< 5,0	< 5,0	< 5,0
ЗМЧ, КОЕ/см ³ при 37 °С	6; 4	1; 0	5; 4	1; 0	3; 2	0; 0
Загальні колі форми, КОЕ/100 см ³	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено	Не виявлено

0,15; 1,63; 0,55 мг/дм³; для хлоритів – 0,08; 0,54; 0,12 мг/дм³. Концентрації діоксиду хлору та хлоритів у тупиковій точці водорозподільної мережі за той же період склали: для СЮ₂ – 0,15; 1,5; 0,5 мг/дм³; для хлоритів – 0,08; 0,48; 0,12 мг/дм³.

Керівництво та персонал водоканалу в процесі експлуатації обладнання, згідно з поданою інформацією, зіткнулося з такими проблемами: 1) збільшення дози діоксиду хлору супроводжується збільшенням концентрації хлоритів; 2) гіпохлорит

натрію при вторинному хлоруванні ситуацію суттєво не змінює. Відповідь на перше питання полягає в тому, що пропорційність збільшення концентрації хлоритів та дози діоксиду хлору є однією з основних закономірностей хімізму процесів знезараження води діоксидом хлору [3–5]. Щодо другого питання слід зазначити наступне: гіпохлорит натрію частково окиснює хлорити до діоксиду хлору, тому концентрація хлоритів не знижується. І перше, і друге не є проблемою, а перевагою і діоксиду хлору, і такої комбінованої технології його застосування. Оскільки постійна циркуляція у мережі залишкового дезінфектанту (діоксиду хлору та хлоритів) є запорукою епідемічної безпеки питної води [11].

Висновки:

1. Передокиснення річкової води діоксидом хлору, коагуляція, фільтрування, постзнезараження хлором – найбільш оптимальна серед ком-

бінованих схем при традиційних очисних спорудах і високому вмісті органічних речовин у воді. Застосування діоксиду хлору на стадії передокиснення усуває утворення ТГМ у питній воді, гарантує мікробіологічну якість води, не призводить до перевищення ГДК хлоритів.

2. Наступне хлорування води частково окиснює хлорити, які утворилися, до діоксиду хлору, тим самим підвищуючи ефективність знезараження, забезпечує пролонговану знезаражуючу дію у водорозподільних мережах.

3. Комплексна послідовна дія діоксиду хлору та хлору має гігієнічний (знижується кількість побічних продуктів) та економічний (витрати окиснювачів зменшуються) ефекти.

4. Результати моніторингу вмісту діоксиду хлору та хлоритів свідчать про відповідність якості питної води чинним вимогам щодо вмісту хлоритів у питній воді.

Список літератури:

1. «Про схвалення концепції Загальнодержавної цільової соціальної програми «Питна вода України» на 2022-2026 роки». Розпорядження Кабінетом Міністрів України від 28 квітня 2021 р. № 388-р. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/388-2021-%D1%80#Text>
2. «Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні у 2021 році». 2022. 326 с. Режим доступу: <https://www.minregion.gov.ua/wp-content/uploads/2022/12/nacjonalna-dopovid-pro-yakist-pytnoi-vody-ta-stan-pytного-vodopostachannya-v-ukrayini-u-2021-rocz.pdf>
3. Бабієнко В. В., Мокієнко А. В. Вода та інфекції. Патогени та їх інактивація : монографія. Одеса : Прес-кур'єр, 2023. 584 с. URI: <https://repo.odmu.edu.ua:443/xmlui/handle/123456789/12573>
4. Бабієнко В. В., Мокієнко А. В. Гігієна води та водопостачання населених місць: навчальний посібник. Одеса : Прес-кур'єр, 2021. 372 с. URI: <https://repo.odmu.edu.ua:443/xmlui/handle/123456789/10460>
5. Бабієнко В. В., Мокієнко А. В. Знезараження води : курс лекцій. Одеса : Прес-кур'єр, 2022, 276 с. URI: <https://repo.odmu.edu.ua:443/xmlui/handle/123456789/11964>
6. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum. Geneva: World Health Organization; 2017. 631 p. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. Режим доступу: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/254637/9789241549950-eng.pdf>
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. Режим доступу: <https://lawthek.eu/detail/d7a5c23d-6ca3-4a5a-b6a2-96e6fd6264b7/en/SINGLE>
8. 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 N 400. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 1 липня 2010 р. за N 452/17747. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text>
9. ДСТУ 7525:2014 Вода питна. Вимоги та методи контролювання якості. Режим доступу: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=61154.
10. Петренко Н.Ф. Гігієнічне обґрунтування застосування діоксиду хлору у технологіях водопідготовки. Дис. ... к. б. н. 14.02.01. Інститут гігієни та медичної екології ім. О.М. Марзєєва АМН України. Київ. 2002. 164 с.
11. Петренко Н.Ф. Наукове обґрунтування комбінованих методів знезараження питної води. Дис. ... д. б. н. 14.02.01 ДУ «Інститут гігієни та медичної екології ім. О.М. Марзєєва Академії медичних наук України». К. 2012. 396 с.

Spasonova L.M., Bondarchuk O.Yu., Mokienko A.V. RETROSPECTIVE ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF IMPLEMENTATION OF THE TECHNOLOGY OF COMBINED DISINFECTION OF DRINKING WATER WITH CHLORINE DIOXIDE AND SODIUM HYPOCHLORITE

The article considers one of the aspects of the problem of drinking water quality by introducing combined methods of water disinfection into the practice of water treatment. The purpose of the work was a retrospective analysis of the effectiveness of the implementation of the technology of combined disinfection of drinking water with chlorine dioxide and sodium hypochlorite. The analytical reference presents the characteristics of the chlorine dioxide disinfection technology of centralized water supply. The characteristics of the source of centralized water supply in the city of Horishni Plavni are given. It was established that the value of ClO_2 -absorption of river water is $0.75 \pm 0.05 \text{ mg/dm}^3$ and is constant in the range of injected chlorine dioxide doses of $1.0 - 2.5 \text{ mg/dm}^3$. It is shown that as a result of preoxidation of river water with chlorine dioxide, the values of color, turbidity, permanganate oxidizability, nitrites, and manganese decrease. It has been established that pre-oxidation of river water with chlorine dioxide, coagulation, filtration, post-disinfection with chlorine is an effective technology for traditional treatment facilities and a high content of organic substances in water. The use of chlorine dioxide at the preoxidation stage eliminates the formation of THM in drinking water, guarantees the microbiological quality of water, does not lead to exceeding the norm of chlorites. It is shown that the subsequent chlorination of water partially oxidizes the chlorites that have formed to chlorine dioxide. This increases the effectiveness of disinfection; provides chlorite removal and prolonged action in water distribution networks. It is substantiated that the complex sequential action of chlorine dioxide and chlorine has hygienic (minimal amount of by-products are formed) and economic (expenses of oxidants are reduced) effects. The results of monitoring the content of chlorine dioxide and chlorites indicate that the quality of drinking water meets the current requirements for the content of chlorites in drinking water. The expediency of further implementation of the technology of combined use of chlorine dioxide and chlorine (sodium hypochlorite) for water disinfection is substantiated.

Key words: drinking water, river water, purification, disinfection, chlorine dioxide, sodium hypochlorite, combination, technology, efficiency, analysis.