



УДК 504.064:621.311

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.6.2023.14>

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПІДКИСЛЕННЯ ВОДОЦИРКУЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМИ НА СКИДИ СУЛЬФАТ-ІОНІВ ЗІ ЗВОРОТНИМИ ВОДАМИ

П. М. Кузнецов<sup>1</sup>

Робота присвячена дослідженню впливу технології підкислення шляхом стабілізаційної обробки (СО) сірчаною кислотою ( $H_2SO_4$ ) охолоджуючої води водоциркуляційної оборотної системи охолодження (ОСО) на скиди сульфат-іонів ( $SO_4^{2-}$ ) зі зворотними водами та вплив водного скиду на поверхневій воді. Об'єктом дослідження є вміст  $SO_4^{2-}$  в поверхневій воді р. Стир та технологічних водах Рівненської АЕС (РАЕС), предметом дослідження є СО з використанням  $H_2SO_4$  для підкислення ОСО та її вплив на скиди  $SO_4^{2-}$  зі зворотними водами ОСО РАЕС. Метою роботи є дослідження технології СО ОСО РАЕС з використанням  $H_2SO_4$  та виявлення забруднення поверхневої води р. Стир, що обумовлено  $SO_4^{2-}$  через СО ОСО, що застосовується у РАЕС та дослідження технологічного режиму обробки СО атомних електростанцій (АЕС) як джерела антропогенного забруднення  $SO_4^{2-}$ . Актуальність роботи обумовлена необхідністю реалізації заходів з охорони водних ресурсів від забруднення та раціоналізації їх використання в технологіях водопідготовки ОСО електростанцій. Мінімізація екологічного впливу зі зниженням використання реагентів для СО, що розглядається в даному дослідженні, є важливою з огляду сталого розвитку енергетичного сектора. Представлені результати досліджень та аналізу дозування  $H_2SO_4$  для забезпечення водно-хімічного режиму (ВХР) ОСО з обробкою  $H_2SO_4$  дозволяє нейтралізувати лужність охолоджуючої води, що обумовлена вмістом бікарбонат ( $HCO_3^-$ ) та карбонат-іонів ( $CO_3^{2-}$ ) та перевести частину іонів кальцію, що зв'язана з іонами  $HCO_3^-$  та  $CO_3^{2-}$  в постійну жорсткість. Застосування  $H_2SO_4$  для СО може бути доцільним для забезпечення ВХР з метою зменшення накипу в ОСО, за критеріями підкислення додаткової охолоджуючої води, що визначається критерієм дозування.

Практична значущість роботи полягає в запровадженні на РАЕС технологічного режиму СО ОСО зі забезпеченням підтримання оптимальних показників якості ВХР ОСО, зменшення використання  $H_2SO_4$  та мінімізацію скидів  $SO_4^{2-}$  в водний об'єкт – р. Стир. Дослідження може бути застосоване для будь-якої електростанції, що використовують технологію підкислення ОСО зі застосуванням  $H_2SO_4$ .

**Ключові слова:** скиди забруднюючих речовин, водопідготовка, екологічні нормативи, водний скид.

<sup>1</sup> здобувач третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти,  
(Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)  
e-mail: kuznetpavel@gmail.com  
ORCID: 0000-0002-8263-0000

## INVESTIGATION OF THE EFFECT OF WATER CIRCULATION ACIDIFICATION ON EFFLUENT SULPHATE ION DISCHARGES

P. M. Kuznietsov

The paper is devoted to the study of the impact of the acidification technology by stabilisation treatment (ST) with sulphuric acid ( $H_2SO_4$ ) of cooling water of the water circulation system (WCS) on the discharge of sulphate ions ( $SO_4^{2-}$ ) with return water and the impact of water discharge on surface waters. The subject of the study is  $SO_4^{2-}$  content in the surface water of the Styr River and the process water of the Rivne NPP (RNPP), the subject of the study is the ST with use  $H_2SO_4$  for WCS and its impact on the  $SO_4^{2-}$  discharge with the return water of the RNPP. The aim of the study is to investigate the ST technology of the RNPP using  $H_2SO_4$  and to determine the  $SO_4^{2-}$  contamination of the surface water of the Styr River caused by the ST used at the RNPP and to determine the influence of a nuclear power plant (NPP) operation modes on the minimisation of  $SO_4^{2-}$  sources. The relevance of the work is due to the need to implement measures to protect water resources from pollution and their rational use in water treatment technologies of NPPs WCS. Minimising the environmental impact by reducing the use of reagents for the ST, which is considered in the study, is important in view of the sustainable development of the energy sector. The paper presents the results of research and analysis of  $H_2SO_4$  dosing to ensure the water chemical regime (WCR), the ST with  $H_2SO_4$  regime allows to neutralise the alkalinity of the cooling water of the cooling plant due to the content of bicarbonate ( $HCO_3^-$ ) and carbonate ( $CO_3^{2-}$ ) ions and to convert part of the calcium ions bound to  $HCO_3^-$  and  $CO_3^{2-}$  ions to constant hardness. The use of  $H_2SO_4$  for ST may be appropriate for water treatment to reduce scale in the cooling water system, according to the criteria for acidification of makeup cooling water, which is determined by the dosing criterion. The practical significance of the work is the introduction of the technological regime of cooling water treatment at RNPP to ensure the maintenance of optimal quality indicators of cooling water treatment, reduction of  $H_2SO_4$  consumption and minimisation of  $SO_4^{2-}$  discharges into the water body – the Styr River. In general, the results of the study indicate that the ST WCS RNPP has no environmental impact on the Styr River water body. The study can be applied to any power plant that with WCS uses the technology of acidification of the ST using  $H_2SO_4$ .

**Key words:** pollutant discharges, water treatment, environmental regulation, water discharge.

### Вступ

Актуальність моніторингових досліджень, що пов'язують технологічні процеси промислових об'єктів та формування скидів забруднюючих речовин обумовлена необхідністю оптимізації технологічних процесів з метою мінімізації екологічного впливу. Вода є незамінним компонентом для роботи атомних електростанцій (АЕС), оскільки вона потрібна для охолодження в процесах пароводяного циклу (Macknick et al, 2012), до якості води в системах охолодження висуваються значні вимоги (Kuznietsov & Biedunkova, 2023), з цією метою для додаткової води систем охолодження застосовується водопідготовка, зокрема стабілізаційна обробка (СО). СО зі  $H_2SO_4$  дозволяє нейтралізувати лужність охолоджуючої води ОСО, що обумовлена іонами  $HCO_3^-$  та  $CO_3^{2-}$  та перевести частину іонів кальцію, що зв'язана з іонами  $HCO_3^-$  та  $CO_3^{2-}$  в постійну жорсткість (Бедункова і Кузнєцов, 2023), яка не утворює накипу при температурному впливі та має меншу схильність до утворення накипу в ОСО (Кузнєцов і Бедункова, 2022).  $H_2SO_4$  може бути найбільшою за обсягом хімічною речовиною, що використовується на електростанціях. Різке

підвищення ціни на концентровану  $H_2SO_4$  за останні кілька років призвело до оптимізації її використання на багатьох електростанціях. Зокрема експлуатуючі організації електростанцій реагують на це впровадженням програм для мінімізації або виключення використання  $H_2SO_4$  для СО охолоджуючої води ОСО (Strategies, 2010). До того ж  $SO_4^{2-}$ , що утворюються при дисоціації  $H_2SO_4$ , концентруються в охолоджуючій воді ОСО, що може спричинити руйнування бетонних частин каналів і градирень (Argüelles et al, 2021).

Проведений аналіз останніх публікацій за темою дослідження свідчить про наявність широкого застосування та значної ефективності СО  $H_2SO_4$  у боротьбі з кальцієвими відкладеннями (Kuznietsov & Biedunkova, 2023), але цей метод має ряд недоліків (Norbojev et al, 2023):

- зниження значення рН і, як наслідок, різке збільшення швидкості корозії конструкційних матеріалів ОСО;
- збільшення корозійно-активної домішки  $SO_4^{2-}$  у охолоджуючій воді;
- проблеми з утилізацією кислих стічних вод з високим вмістом  $SO_4^{2-}$ ;

– підвищений вміст розчинних солей та мінералізації охолоджуючої води.

Незважаючи на значне скорочення антропогенного викиду атмосферної сірки протягом останніх років, невирішеним питанням є поточний рівень концентрації  $\text{SO}_4^{2-}$  у поверхневих і ґрунтових водах, що залишається вищим за природний фоновий рівень (Dixit et al, 2015). Забруднення поверхневих вод  $\text{SO}_4^{2-}$  може мати токсичний вплив на водні рослини та тваринні організми, а також може мати негативні наслідки для здоров'я людини (Zak et al, 2021). Збільшення надходження  $\text{SO}_4^{2-}$  розглядається як проблема в управлінні прісноводними водними екосистемами (Peterson, 1990).  $\text{SO}_4^{2-}$  присутні в навколишньому середовищі в складі циклу сірки, який починається з ерозії сульфатів (евапоритів) і сульфідів, що містяться у гірських породах і мінералах, відбувається виділення сірко-вмісних сполук в навколишнє середовище, які при взаємодії з повітрям, перетворюється в  $\text{SO}_4^{2-}$  та поглинаються рослинами, мікроорганізмами і перетворюється в орґано-сірко-вмісні сполуки (Little et al, 2000). Існує обмежена інформація щодо інгаляційної та пероральної, хронічної та субхронічної токсичності, канцерогенності, а також репродуктивної токсичності сульфату у людини і тварин (RAIS, 1998). Розрізняють прямий екологічний вплив  $\text{SO}_4^{2-}$  на довкілля і непрямий, через його метаболіти, зокрема сульфід. Відновлення  $\text{SO}_4^{2-}$  до сульфідів відбувається шляхом окислення орґанічного вуглецю бактеріями (рис. 1), сульфід має

сильний несприятливий вплив на прісноводні організми та екосистеми (Barker et al, 2017). Частка протікання процесу відновлення  $\text{SO}_4^{2-}$  до сульфідів становить 12–81% (Chen et al, 2016). Природні концентрації  $\text{SO}_4^{2-}$  у водних об'єктах демонструють значну мінливість та зазвичай коливаються від 0 до 630 мг/дм<sup>3</sup> в річках, від 0 до 250 мг/дм<sup>3</sup> в озерах і від 0 до 230 мг/дм<sup>3</sup> у підземних водах, однак можуть значно збільшуватись внаслідок антропогенного впливу (Zak et al, 2021). Більшість країн світу рекомендують стандарт питної води для  $\text{SO}_4^{2-}$  від 250 до 500 мг/л (WHO, 2004); служба громадської охорони здоров'я США рекомендувала контрольний рівень вмісту  $\text{SO}_4^{2-}$  у питній воді 250 мг/дм<sup>3</sup> (RAIS, 1998); канадськанастановащодоґраничнодопустимоїконцентрації $\text{SO}_4^{2-}$ впитнійводістановить 500 мг/ дм<sup>3</sup> (GBC, 2006); згідно з Австралійськими рекомендаціями щодо питної води (NHMRC, 2004), смаковий поріг  $\text{SO}_4^{2-}$  знаходиться в межах 250–500 мг/дм<sup>3</sup>. Тому, враховуючи екологічний вплив та обмежену інформацію про токсичність  $\text{SO}_4^{2-}$  вирішення питань мінімізації антропогенного надходження  $\text{SO}_4^{2-}$  зі зворотними водами є важливим.

Доза реагентів для здійснення СО визначається на етапі проектування електростанції та, зазвичай, проводиться в сталих концентраціях, що не враховує подальші зміни технологічних режимів та показників якості охолоджуючої води при експлуатації (Kuznietsov & Biedunkova, 2023). Використання хімічних реагентів для водопідготовки та підтримання водно-хімічного режиму (ВХР) технологічних середовищ електростанцій впливає на економічність експлуатації електростанції в цілому (SC090012/R2, 2011). Сучасні підходи до реалізації технології СО передбачають застосування методології дозування реагентів з врахуванням екологічного та економічного факторів (Zhang et al, 2023). Для підвищення економічності роботи повинні вживатись заходи з виключенням можливості необґрунтованого надлишку дозування реагентів зі впровадженням дієвих механізмів оптимізації їх використання (Кузнецов і Бедункова, 2022). Оптимізація використання хімічних реагентів для електростанцій пов'язана зі скидом забруднюючих речовин із зворотними водами (Кузнецов, 2022). Недостатньо висвітленим та вивченим є питання законномірностей впливу скидів зворотної води ОСО на вміст  $\text{SO}_4^{2-}$  в поверхневих водах

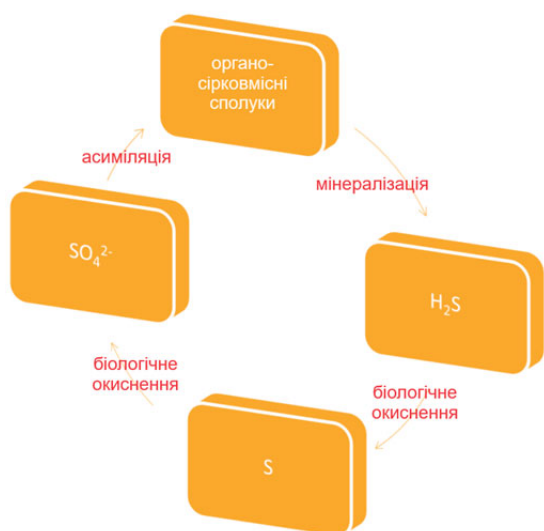


Рис. 1. Схематичне зображення природного циклу сірки у поверхневих водах

внаслідок реалізації технології СО з використанням  $H_2SO_4$ . Дослідження цих процесів дозволить проводити оптимізацію використання  $H_2SO_4$  у технології СО з метою обґрунтованої мінімізації екологічного впливу зворотних вод ОСО на поверхневій воді водойм зі скидом  $SO_4^{2-}$ .

Метою даного дослідження є здійснення оцінки впливу технології СО ОСО РАЕС з використанням  $H_2SO_4$  на скиди  $SO_4^{2-}$  зі зворотною водою ОСО. Практична цінність дослідження полягає в оцінці нерадіаційного екологічного впливу водного скиду забруднюючої речовини діючої АЕС України. Робота тісно пов'язана з вирішенням завдань, що наведені у Водній стратегії України на період до 2050 року (розпорядження Кабінету Міністрів України від 09.12.2022 № 1134-р).

Для досягнення мети для виконання дослідження були поставлені наступні задачі:

- виявити закономірності та провести оцінку ефективності застосування СО з використанням  $H_2SO_4$ ;
- провести аналіз динаміки змін концентрації  $SO_4^{2-}$  в технологічних водах ОСО РАЕС та поверхневій воді р. Стир;
- провести екологічну оцінку впливу водного скиду  $SO_4^{2-}$  на природний водний об'єкт.

Об'єктом дослідження є скиди  $SO_4^{2-}$  зворотної води ОСО РАЕС внаслідок СО з використанням  $H_2SO_4$ . Предметом дослідження є процеси формування та змін концентрації  $SO_4^{2-}$  в поверхневій воді р. Стир в зоні впливу водних скидів РАЕС.

Проблематика дослідження полягає у вивченні процесів скиду забруднюючих речовин зі зворотними водами ОСО у природні водойми, оскільки забруднюючі речовини можуть призводити до змін хімічної рівноваги природних компонентів та становлять потенційну екологічну небезпеку.

Актуальність роботи обумовлена необхідністю дослідження нерадіаційного впливу водного скиду АЕС старих проектних рішень та технологій, що для них застосовуються.

### Матеріал і методи

Джерелом технічного водопостачання РАЕС є р. Стир, що належить до водойми рибогосподарського призначення. Контроль гідрологічного режиму р. Стир в районі водозабору РАЕС проводиться на гідрологічному посту м. Варащ, зворотні води ОСО РАЕС збираються системою промисловою каналізації і скидаються в р. Стир без попереднього очищення. Водопідготовка

охолоджуючої води ОСО РАЕС проводиться освітленням шляхом вапнування в бікарбонатному режимі з наступною стабілізаційною обробкою  $H_2SO_4$ . Витрати на підживлення ОСО, відповідно до умов дозволу на спеціальне водокористування (Дозвіл ..., 2020) не повинні перевищувати витрату  $2,79 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $88 \text{ млн.м}^3/\text{рік}$ ). Зворотна вода ОСО РАЕС скидається в р. Стир, витрати якої за умовами (Дозвіл ..., 2020) не повинні перевищувати  $0,7 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $18,36 \text{ млн.м}^3/\text{рік}$ ).

Гранично допустимі концентрації (ГДК)  $SO_4^{2-}$  у водоймах рибогосподарського та побутового призначення України складають  $100 \text{ мг}/\text{дм}^3$  (Вимоги, 1990) та  $500 \text{ мг}/\text{дм}^3$  (Вимоги, 2022) відповідно. Затверджена допустима концентрація  $SO_4^{2-}$  у зворотних скидних водах РАЕС, складає  $250 \text{ мг}/\text{дм}^3$  (Дозвіл ..., 2020), для порівняння на АЕС Isar 2, що має аналогічну систему ОСО встановлені ліміти скидів сульфат іонів  $900 \text{ мг}/\text{дм}^3$  (SC090012/R2, 2011).

Для контролю утворення накипу внаслідок випадіння карбонату кальцію  $CaCO_3$  в ОСО застосовували критерій різниці значень коефіцієнтів випаровування  $\phi$  та  $\psi$ , величина яких не повинна перевищувати 0,2. Коефіцієнт випаровування  $\phi$  розраховується за хлорид-іонами,  $\psi$  розраховується за жорсткістю загальною за рівнянням (1), де  $Cl$  (Ж) вміст хлорид-іонів (загальна жорсткість),  $\text{мг}/\text{дм}^3$  ( $\text{ммоль}/\text{дм}^3$ ) в охолоджуючій (ОСО) та додатковій (ДВ) водах:

$$\phi = Cl_{\text{осо}}/Cl_{\text{дв}}; \psi = Ж_{\text{осо}}/Ж_{\text{дв}} \quad (1)$$

У процесі дослідження застосовували такі методи:

польовий метод, відбір проб води здійснювали відповідно (ДСТУ ISO 5667-6-2001, 2001);

лабораторний метод, вимірювання концентрації  $SO_4^{2-}$  здійснювали за методикою (МБВ 081/12-0177-05, 2005);

розрахунковий та статистичний методи, використовували програму розрахунків та візуалізації даних за (Wessa, 2023).

### Результати та обговорення

Водопідготовка додаткової води ОСО РАЕС включає передочищення води р. Стир: вапнуванням в бікарбонатному режимі та СО з використанням  $H_2SO_4$ . Процес СО з використанням  $H_2SO_4$  має негативні аспекти технологічного впливу, оскільки збільшує агресивність води ОСО по відношенню до бетону гідроспород (Argüelles et al, 2021), інтенсифікує корозію металевих трубопроводів і обладнання, та вима-

гає дотримання спеціальних вимог з охорони праці (SC090012/R2, 2011). З 2017 р. з метою мінімізації негативних впливів та уникнення технологічних обмежень для ОСО РАЕС запроваджений режим оптимізації реагентів із частковим дозуванням  $H_2SO_4$ . Згідно з проєктним рішенням РАЕС, до 2017 р. проводилось постійне дозування  $H_2SO_4$  в додаткову охолоджуючу воду ОСО до значень водневого показника додаткової охолоджуючої води рН 7,5–7,8 од. Для оптимізації використання  $H_2SO_4$  при обробці ОСО РАЕС був використаний фактор (НЛз) доцільності підкислення додаткової охолоджуючої води для нейтралізації загальної лужності охолоджуючої води ОСО (2, 3), що розраховується за різницею значень розрахункової загальної лужності (РЛз) та фактичної загальної лужності (ФЛз) охолоджуючої води. При значенні критерію НЛз, що перевищує 0,3 ммоль/дм<sup>3</sup> проводиться дозування  $H_2SO_4$  для зменшення величини лужності та інтенсивності накопичення  $HCO_3^-$  та  $CO_3^{2-}$  в охолоджуючій воді ОСО.

$$НЛз = РЛз - ФЛз \quad (2)$$

$$РЛз = \varphi \cdot ФЛз_{ДВ} \quad (3)$$

де  $ФЛз_{ДВ}$  фактична лужність додаткової води ОСО.

За проєктним постійним дозуванням  $H_2SO_4$  для СО ОСО рН додаткової води підтримувався в діапазоні рН 7,5–7,8 од. При впровадженні частково дозування за критерієм НЛз, середні значення рН знаходились в діапазоні 8,7–9,3 од., максимальні значення рН відповідали значенням притаманним освітленій воді при вапнуванні (рис. 2).

Середні та максимальні значення НЛз охолоджуючої води ОСО РАЕС за періоди постійного та часткового дозування  $H_2SO_4$  співставні. Так, середні значення знаходились в діапазоні 0,13–0,23 ммоль/дм<sup>3</sup>, максимальні 0,25–0,52 ммоль/дм<sup>3</sup> (рис. 3).

Тобто був реалізований факторіальний режим дозування реагенту, що відповідав дозуванню  $H_2SO_4$  і не застосуванню підкислення  $H_2SO_4$  для обробки ОСО та визначався критерієм дозування (НЛз, РЛз).

Запровадження факторіального режиму дозування  $H_2SO_4$  для СО ОСО РАЕС за критерієм дозування НЛз обумовило зменшення споживання  $H_2SO_4$  (рис. 4).

Середньорічна кількість споживання  $H_2SO_4$  за 2017–2022 рр. склала 228 т/рік, за період постійного дозування  $H_2SO_4$  2015–2016 рр. – 410,5 т/рік. Зменшене дозування  $H_2SO_4$  зменшує вміст  $SO_4^{2-}$  у скидних водах та зменшує надходження  $SO_4^{2-}$  зі скидними водами (рис. 4).

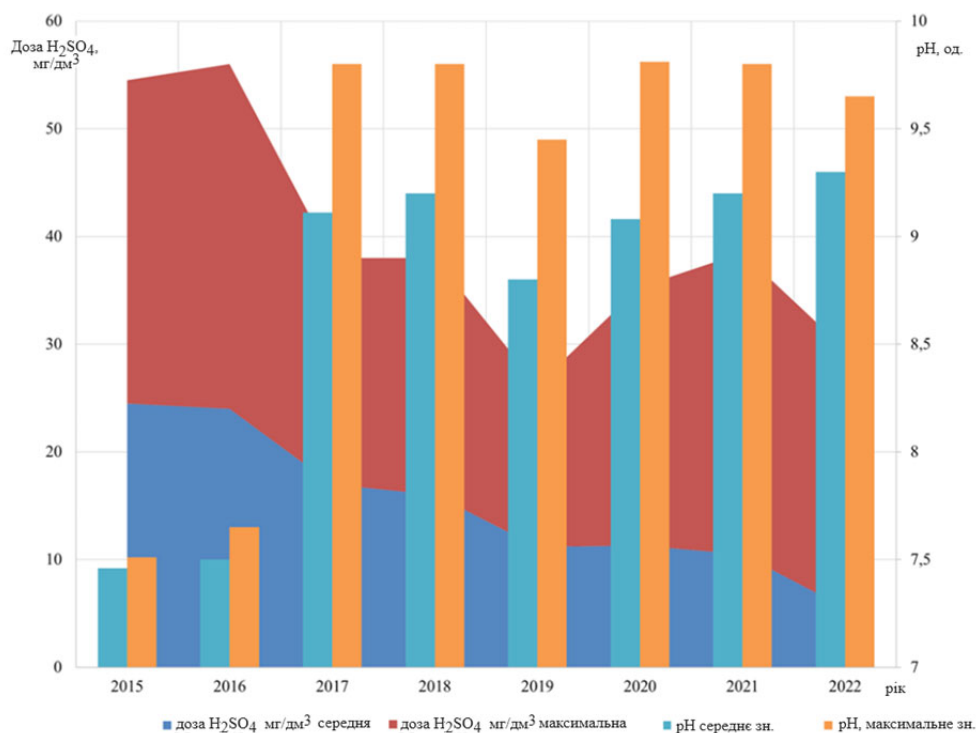


Рис. 2. Доза  $H_2SO_4$  для СО та рН додаткової води ОСО РАЕС

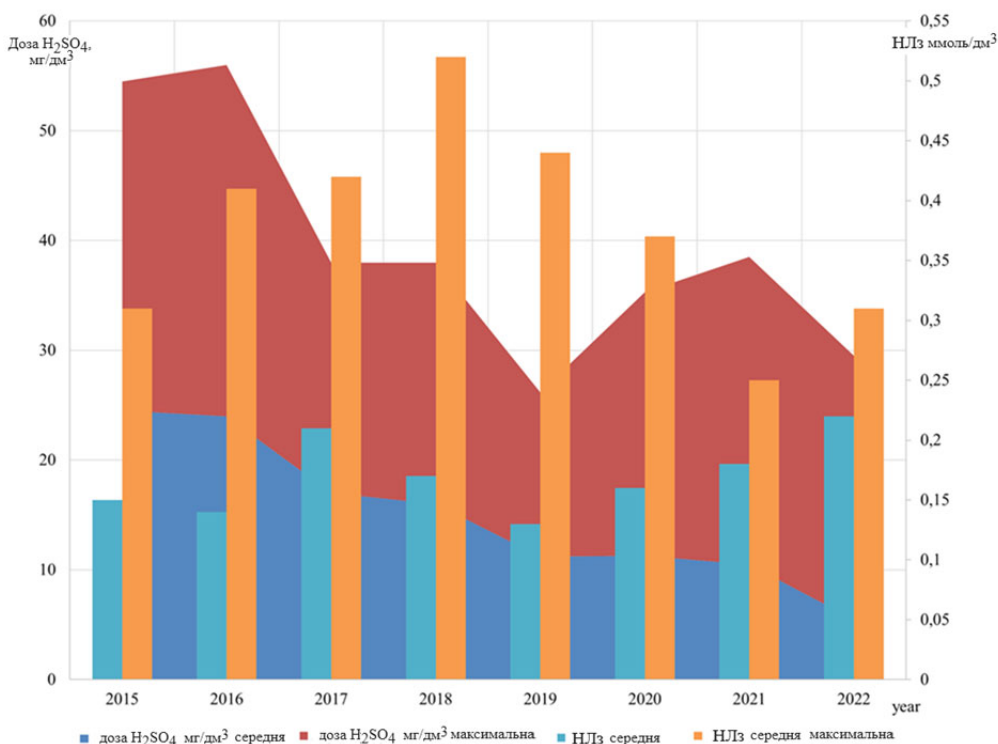


Рис. 3. Доза H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> для СО додаткової води та значення НЛз охолоджуючої води ОСО РАЕС

Концентрація SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> в воді р. Стир за 2015–2022 р. до водозабору РАЕС знаходилась в діапазоні 20,3–92,6 мг/дм<sup>3</sup>, при серед-

ньому значенні 41,3±13,5 мг/дм<sup>3</sup>; після скиду зворотних вод ОСО РАЕС 21,0–107,0 мг/дм<sup>3</sup>, середнє значення 42,8±14,5 мг/дм<sup>3</sup>; додат-

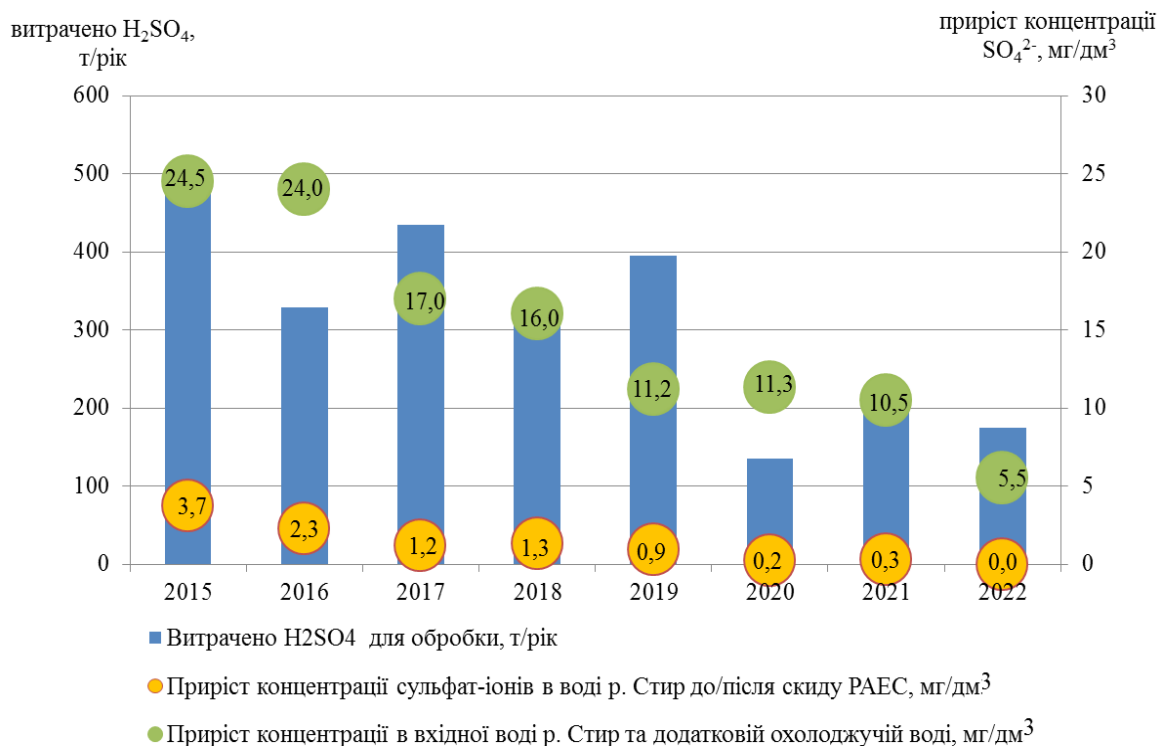


Рис. 4. Динаміка змін середньорічних кількостей H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> для СО та відповідні прирости концентрації SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>

Таблиця 1

Зміна концентрації  $\text{SO}_4^{2-}$  в технологічних водах РАЕС та воді р. Стир (2015–2022 рр.)

Показник	р. Стир до водозабору РАЕС, мг/дм <sup>3</sup>	Додаткова вода ОСО РАЕС, мг/дм <sup>3</sup>	Охолоджуюча вода ОСО РАЕС, мг/дм <sup>3</sup>	р. Стир після скиду зворотних вод ОСО РАЕС, мг/дм <sup>3</sup>
Середнє	41,3	52,3	154,0	42,8
Стандартне відхилення	13,5	14,6	56,3	14,5
Мінімум	20,3	30,6	81,2	21,0
Максимум	92,6	120,3	271,3	107,0

ковій воді ОСО 30,6–120,3 мг/дм<sup>3</sup>, середнє значення 52,3±14,6 мг/дм<sup>3</sup>; охолоджуючій воді ОСО РАЕС 81,2–271,3 мг/дм<sup>3</sup>, середнє значення 154,0±56,3 мг/дм<sup>3</sup> (табл. 1). Аналіз концентрації  $\text{SO}_4^{2-}$  у воді р. Стир до водозабору РАЕС, після скиду зворотної води ОСО РАЕС та додатковій воді ОСО РАЕС виявляє помітні особливості їх розподілу (рис. 5).

Упродовж року у воді р. Стир спостерігалось незначне збільшення  $\text{SO}_4^{2-}$  в зимові та весняні місяці (рис. 6). Концентрація  $\text{SO}_4^{2-}$  в охолоджуючій воді ОСО РАЕС визначалась коефіцієнтом випаровування  $\phi$ . У порівнянні з додатковою водою, вміст  $\text{SO}_4^{2-}$  в охолоджуючій воді ОСО збільшується пропорційно збільшенню коефіцієнту випаровування  $\phi$ . Сезонна мінливість для концентрацій  $\text{SO}_4^{2-}$  в воді р. Стир до водозабору РАЕС, після скиду зворотної води ОСО РАЕС, додатковій воді ОСО РАЕС не прослідкується (рис. 6).

За результатами контролю води р. Стир до водозабору та після скиду зворотних вод ОСО РАЕС концентрація  $\text{SO}_4^{2-}$  не перевищує

гранично-допустиму концентрацію в водах рибогосподарського призначення – 100 мг/дм<sup>3</sup>. Фіксується незначний, до 2%, приріст концентрації  $\text{SO}_4^{2-}$ . Аналізуючи дані, що зображені на рис. 4, 6 в можна констатувати, що відбувається зменшення різниці приросту  $\text{SO}_4^{2-}$  до водозабору та після скиду в воді р. Стир в період 2017–2022 рр., що корелюється зі зниженням кількості використаної  $\text{H}_2\text{SO}_4$  для СО ОСО РАЕС. Відстеження формування концентрації  $\text{SO}_4^{2-}$  у воді р. Стир на ділянках до водозабору РАЕС та після скиду зворотної води ОСО РАЕС свідчить про її помітне зростання за повної відсутності впливу на це додаткової води ОСО РАЕС.

Для оцінки ведення водно-хімічного режиму ОСО застосовуються різні критерії: індекс Ланжельє, Індекс Ризнера, індекс Ларсона-Скольда, різниці коефіцієнтів випаровування  $\phi - \psi$ , встановлення обмежень за допустимими значеннями жорсткості охолоджуючої води. Збереження пропорційності зміни значень  $\phi$  та  $\psi$  свідчить про пропорційність упарювання іонів кальцію, магнію та хлоридів в ОСО з відсутністю інтенсивного протікання процесу осадження кальцію у вигляді карбонату кальцію. Середні значення різниці  $\phi$  та  $\psi$  в охолоджуючій воді ОСО РАЕС, що характеризують інтенсивність накипоутворення (НЛз), за період 2012–2022 рр., не перевищують нормоване значення 0,2 та характеризують охолоджуючу воду, як не схильну до утворення накипу (рис. 7). Результати низької інтенсивності накипоутворення в ОСО, отримані за результатами контролю величини критерію утворення накипу  $\phi$  та  $\psi$ , підтверджуються фактичним задовільним станом внутрішніх поверхонь зрошувачів градирень ОСО РАЕС (рис. 8) з дотриманням нормативних значень температурного напору споживачів ОСО РАЕС.

Значення різниці  $\phi$  та  $\psi$  за періоди сталого та часткового дозування сірчаної кис-

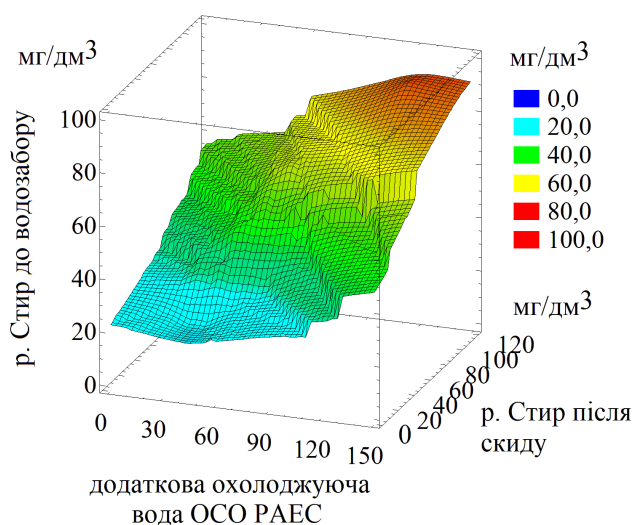


Рис. 5. Формування концентрації  $\text{SO}_4^{2-}$  у воді р. Стир (до водозабору РАЕС, після скиду зворотної води) та додатковій воді ОСО РАЕС

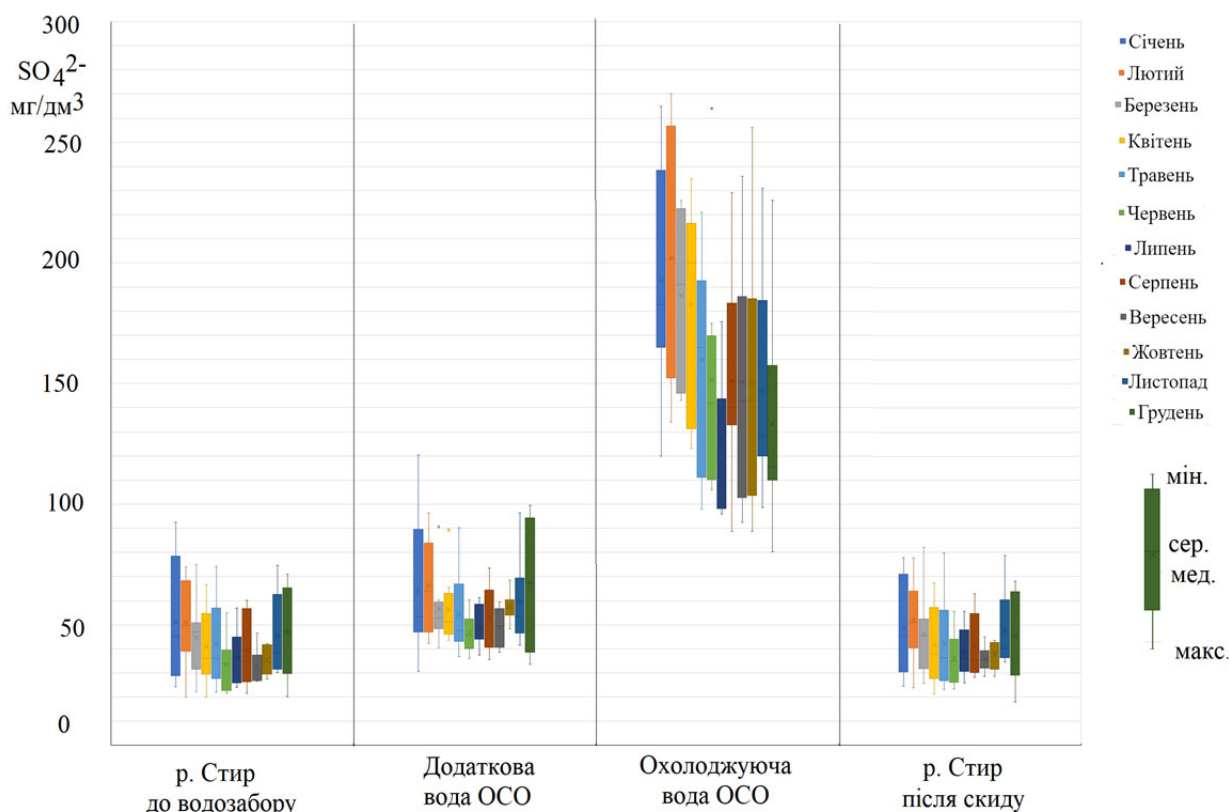


Рис. 6. Середньомісячні концентрації  $\text{SO}_4^{2-}$  у воді р. Стир до водозабору, після скиду зворотної води РАЕС та в технологічних водах ОСО РАЕС (2015–2022 рр.)

лоти співставні. Незафіксоване погіршення візуального стану обладнання (див. рис. 8), отже можна стверджувати, що періоди відсутності дозування  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , через застосування факторіального її дозування, не призвели до інтенсифікації процесів утворення накипу в ОСО РАЕС.

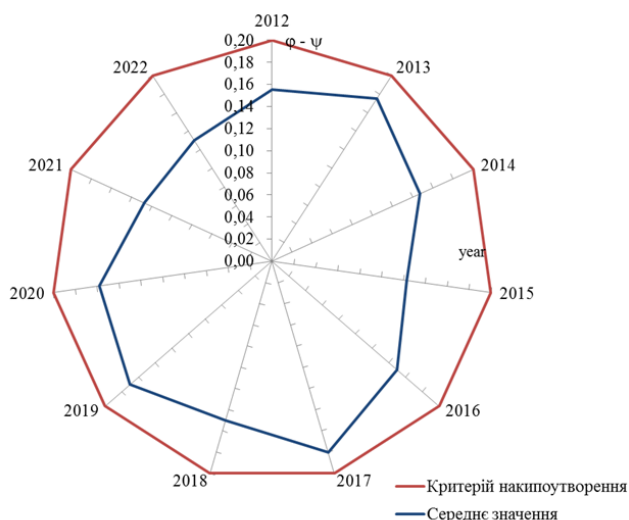
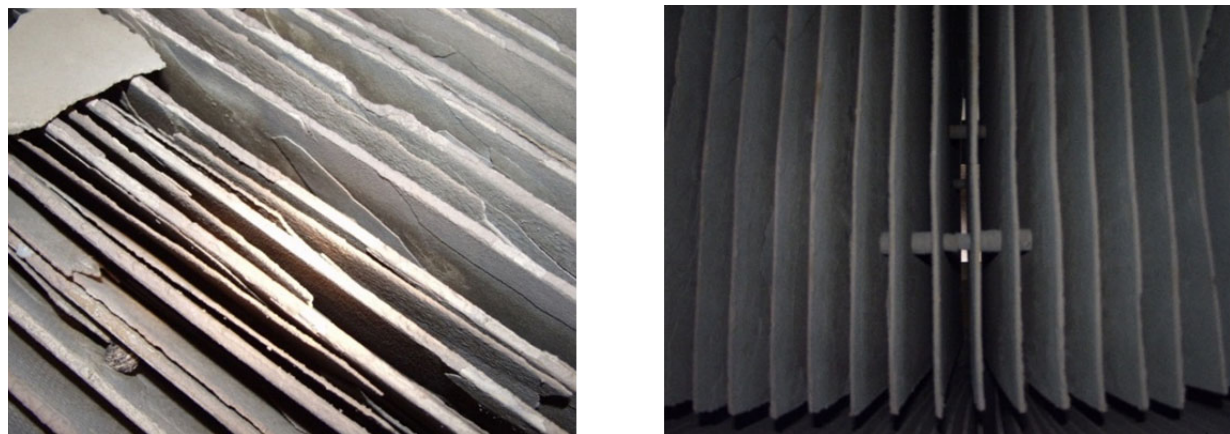


Рис. 7. Динаміка змін середньорічних значень різниці  $\phi$  та  $\psi$  в охолоджуючій воді ОСО РАЕС

### Висновки

Режим СО ОСО зі використанням  $\text{H}_2\text{SO}_4$  для зниження вмісту бікарбонат та карбонат-іонів дозволяє ефективно зменшити процеси накипоутворення в системах охолодження електростанцій, що підтверджується оцінкою накипоутворення за хімічними показниками ВХР ( $\phi - \psi$ ) та візуальним станом обладнання ОСО. Оптимізація використання реагентів для СО охолоджуючої води ОСО дозволяє мінімізувати як кількість реагенту, що використовується для обробки так і скиди забруднюючих речовин у водні об'єкти при експлуатації ОСО. Застосування  $\text{H}_2\text{SO}_4$  може бути доцільним для підтримання водно-хімічного режиму ОСО з метою зменшення утворення накипу  $\text{CaCO}_3$  за фактором підкислення, що визначається необхідністю дозування  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Запроваджений режим оптимізації використання  $\text{H}_2\text{SO}_4$  для СО ОСО у РАЕС забезпечив зменшення використання  $\text{H}_2\text{SO}_4$  та скиди у водний об'єкт. Періоди відсутності СО  $\text{H}_2\text{SO}_4$  не вплинули на процеси накипоутворення в ОСО. За періоди часткового дозування  $\text{H}_2\text{SO}_4$  спостерігається зниження концентрації  $\text{SO}_4^{2-}$  в скидних водах, зменшення приросту





а б

Рис. 8. Стан зрошувачів градирень РАЕС при здійсненні СО ОСО з постійним (а – 2003 р.) та факторіальним (б – 2020 р.) дозуванням  $H_2SO_4$

вмісту  $SO_4^{2-}$  до водозабору та після скиду води ОСО РАЕС, що корелює зі зниженням кількості використаної  $H_2SO_4$  для водопідготовки ОСО та обумовлює зменшення

екологічного впливу на р. Стир. Результати дослідження можуть бути застосовані до будь-якої електростанції з ОСО, де реалізована СО зі використанням  $H_2SO_4$ .

### Список використаної літератури

Бедункова О.О., Кузнєцов П.М. Формування карбонатної системи оборотної охолоджуючої води атомної електростанції та вплив на рН поверхневих вод при зворотних скидах. *Екологічні науки*. 2023. Вип. 3(48). С. 163–168.

Вимоги. Гігієнічні нормативи якості води водних об'єктів для задоволення питних, побутових та інших потреб населення (2022). Наказ МОЗ України від 02.05.2022 № 721. [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0524-22#Text> (дата звернення 05.11.2023).

Вимоги. Узагальнений перелік гранично допустимих концентрацій (ГДК) та орієнтовно безпечних рівнів впливу (ВЗУВ) шкідливих речовин для води рибогосподарських водойм. Мінагрополітики (1990) (Наказ ДСНС України від 31.08.2017 № 47 Про затвердження Переліку галузевих стандартів, чинний до 01.01.2025). [Електронний ресурс]. URL: <http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc> (дата звернення 05.11.2023).

Дозвіл на спецводокористування ВП РАЕС № 53/ПВ/49д-20. (2020). [Електронний ресурс]. URL: <https://e-services.davp.gov.ua/> (дата звернення 05.11.2023).

ДСТУ ISO 5667-6-2001. Якість води. Відбирання проб. Частина 6. Настанови щодо відбирання проб з річок та інших водотоків. [Електронний ресурс]. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=64511](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=64511) (дата звернення 05.11.2023).

Звіт з оцінки впливу нерадіаційних факторів ВП «Рівненська АЕС» ДП «НАЕК «Енергоатом» на довкілля за 2013–2022 [Електронний ресурс]. URL: <https://energoatom.gov.ua/wp-content/uploads//passport.pdf> (дата звернення 05.11.2023).

Кузнєцов П. М. Біологічне забруднення та еколого - утилітарні методи зменшення біологічних перешкод у системі технічного водопостачання електростанцій : *матеріали тез доповідей III Міжнародна науково-практична конференція «Природничі науки: проекти, дослідження, перспективи»*, К.: «Талком», 2022. 176 с. [Електронний ресурс]. URL: [http://dspace.luguniv.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/9537/1/fpn\\_zb\\_mater\\_3michn\\_konf2022.pdf#page=46](http://dspace.luguniv.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/9537/1/fpn_zb_mater_3michn_konf2022.pdf#page=46) (дата звернення 05.11.2023).

Кузнєцов П.М., Бедункова О.О. Порівняльний гідробіологічний моніторинг вод систем технічного водопостачання атомних електростанцій. *Водні біоресурси та аквакультура*, 2022. Вип. 2(12). С. 180–190.

Кузнєцов П.М., Бедункова О.О. Сучасні підходи до здійснення антинакипної обробки технологічних вод оборотних систем охолодження електростанцій. Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2023) : *матеріали тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції* (м. Чернігів, 25–26 травня 2023 р.) : у 2 т. / Національний

університет «Чернігівська політехніка» [та ін.] ; Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2023. Т. 2. с. 158–160. [Електронний ресурс]. URL: <http://ir.stu.cn.ua/123456789/28099> (дата звернення 05.11.2023).

Поверхневі, підземні та зворотні води. Методика вимірювання масової концентрації сульфатів титриметричним методом МВВ № 081/12-0177-05. Стандарт в Україні, 29 с. [Електронний ресурс]. URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=76457](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=76457) (дата звернення 05.11.2023).

Розпорядження Кабінету Міністрів України від 09.12.2022 № 1134-р. Про схвалення Водної стратегії України на період до 2050 року. [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-%D1%80#Text> (дата звернення 05.11.2023).

Argüelles R., Toledo M., Martín, M.A. Study of the Tagus River and Entrepeñas reservoir ecosystem around the Trillo nuclear power plant using chemometric analysis: Influence on water, sediments, algae and fish. *Chemosphere*. 2021. Vol. 279 (130532). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130532>.

Barker J., Alyssa, J.F., Pellerin, A. The Biogeochemical Sulfur Cycle of Marine Sediments. *Frontiers in Microbiology*, 2017. Vol. 10(5). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00849>.

Chen M., Hong X., He Y., Song N., Cai H., Wang C., Li Y.T., Chu H.Y., Krumholz, L.R., Jiang, H.L. Increasing sulfate concentrations result in higher sulfide production and phosphorous mobilization in a shallow eutrophic freshwater lake, *Water Research*, Vol. 201696(1). pp. 94–104. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.03.030>.

GBC Government of British Columbia (2006). British Columbia approved water quality guidelines. Ministry of environment. Canada. Retrieved March 16, 2009, [Електронний ресурс]. URL: [http://www.env.gov.bc.ca/wat/wq/BCguidelines/approv\\_wq\\_guide/approved.html](http://www.env.gov.bc.ca/wat/wq/BCguidelines/approv_wq_guide/approved.html) (дата звернення 05.11.2023).

Kuznietsov P., Biedunkova O. Study of Changes in Acid-Alkaline Balance of Cooling Water Circulating System of Power Plants during Water Treatment by Liming According to Stabilization Treatment Method – 2023, *4th International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering: Proceedings – June 26–29th, 2023, Lviv, Ukraine*. pp. 239–241. <https://doi.org/10.23939/cte2023.239>.

Little B.J., Ray R.I., Pope R.K. (2000) Relationship Between Corrosion and the Biological Sulfur Cycle: A Review. *Corrosion*, 2000. Vol. 56(4). pp. 433–443. <https://doi.org/10.5006/1.3280548>.

Macknick J., Newmark R., Heath G., Hallett K. C. Operational water consumption and withdrawal factors for electricity generating technologies: a review of existing literature. *Environmental Research Letters*, 2012. Vol. 7(4), pp. 045802. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/045802>.

NHMRC. Australian drinking water guidelines. Retrieved March 16, 2004. [Електронний ресурс]. URL: [http://www.nhmrc.gov.au/publications/synopses/\\_files/adwg\\_11\\_06\\_info\\_sheets.pdf](http://www.nhmrc.gov.au/publications/synopses/_files/adwg_11_06_info_sheets.pdf) (дата звернення 05.11.2023).

Norboyev K., Mukhtarov F., Zokhid H.N. Usmonov Study of the influence of cooling water quality and inhibitors on the corrosion rate of brass in cooling water *E3S Web Conf.*, 2023. Vol. 434, 01029 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343401029>.

Peterson N.L. Drinking water and health. Sulphates in drinking water. *Water Sewage Works*, 1990. Vol. 55(143), pp. 425–428.

RAIS Risk Assessment Information System. Toxicity profiles: Toxicity summary of sulphate. Retrieved March 16, 2009. [Електронний ресурс]. URL: [http://rais.ornl.gov/tox/profiles/sulfate\\_f\\_V1.shtml](http://rais.ornl.gov/tox/profiles/sulfate_f_V1.shtml) (дата звернення 05.11.2023).

SC090012/R2. Chemical discharges from nuclear power stations: historical releases and implications for Best Available Techniques Annex Report – SC090012/R2, Environment Agency, *Horizon House*, Deanery Road, [Електронний ресурс]. URL: <https://www.environment-agency.gov.uk> (дата звернення 05.11.2023).

Strategies to Reduce Sulfuric Acid Usage in Evaporative Cooling Water Systems. *Water*, 2010. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.powermag.com/strategies-to-reduce-sulfuric-acid-usage-in-evaporative-cooling-water-systems/> (дата звернення 05.11.2023).

Sumita D., Yadav A., Dwivedi P.D., Das M. Toxic hazards of leather industry and technologies to combat threat: a review, *Journal of Cleaner Production*, 2015. Vol. 87, pp. 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.017>.

Universidad Austral de Chile. Estudio sobre origen de mortalidades y disminución poblacional de aves acuáticas en el santuario de la naturaleza Carlos Anwandter, en la provincia de Valdivia.

[Електронний ресурс]. URL: <https://www.ceachile.cl/Cruces/PDF/25.%20Informe%20final%20UACH.pdf> (дата звернення 05.11.2023).

Wessa P. Free Statistics Software, Office for Research Development and Education, ver. 1.2.1. 2023. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.wessa.net/> (дата звернення 05.11.2023).

World Health Organisation. Sulphate in drinking-water. Background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality. [Електронний ресурс]. URL: [https://cdn.who.int/media/docs/default-source/wash-documents/wash-chemicals/sulfate.pdf?sfvrsn=b944d584\\_4](https://cdn.who.int/media/docs/default-source/wash-documents/wash-chemicals/sulfate.pdf?sfvrsn=b944d584_4) (дата звернення 05.11.2023).

Zak D., Hupfer M., Cabezas A., Jurasinski G., Audet J., Kleeberg A. Sulphate in freshwater ecosystems: A review of sources, biogeochemical cycles, ecotoxicological effects and bioremediation, *Earth-Science Reviews*, 2021. Vol. 212 (103446). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103446>.

Zhang W., Ma L., Jia B., Zhang Z., Liu Y., Duan L. Optimization of the circulating cooling water mass flow in indirect dry cooling system of thermal power unit using artificial neural network based on genetic algorithm. *Applied Thermal Engineering*, 2023. Vol. 223, p. 120040. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120040>.

### References (translated & transliterated)

Biedunkova, O.O., & Kuznietsov, P.M. (2023). Formuvannia karbonatnoi systemy oborotnoi okholodzhuiuchoi vody atomnoi elektrostantsii ta vplyv na poverkhnevyykh vod pry zvorotnykh skydakh [Formation of a carbonate system of recycled cooling water of a nuclear power plant and its influence on the pH of surface waters during return discharges]. *Ekolohichni nauky [Environmental sciences]*, 3(48). 163-168 [in Ukrainian].

Vymohy [Requirements] (2022). Hihienichni normatyvy yakosti vody vodnykh ob'ektiv dlia zadovolenia pytnykh, pobutovykh ta inshykh potreb naselennia [Hygienic water quality standards for water bodies to meet the drinking, domestic and other needs of the population]. [Electronic resource] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0524-22#Text> (access date 05.11.2023) [in Ukrainian].

Vymohy [Requirements] (1990). Uzahalnenyi perelik hranychno dopustymykh kontsentratsii (HDK) ta oriientovno bezpechnykh rivniv vplyvu (VZUV) shkidlyvykh rehovyn dlia vody rybohospodarskykh vodoim. Minahropolityky [A generalized list of maximum permissible concentrations (MPC) and approximate safe exposure levels (ASEL) of harmful substances for water in fishery reservoirs. Ministry of Agrarian Policy]. [Electronic resource] URL: <http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc> (access date 05.11.2023) [in Ukrainian].

Dozvil na spetsvodokorystuvannia VP RAES № 53/RV/49d-20. (2020). [Special water use permit for RNPP No. 53/RV/49d-20] [Electronic resource] URL: <https://e-services.davr.gov.ua/> (access date 05.11.2023) [in Ukrainian].

DSTU ISO 5667-6-2001. (2023). Iakist vody. Vidbyrannia prob. Chastyna 6. Nastanovy shchodo vidbyrannia prob z richok ta inshykh vodotokiv [Water quality. Sampling. Part 6. Guidelines for sampling rivers and other watercourses]. [Electronic resource] URL: [http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=64511](http://online.budstandart.com.ua/catalog/doc-page.html?id_doc=64511) (access date 05.11.2023) [in Ukrainian].

Zvit z otsinky vplyvu neradiatsiinykh faktoriv VP «Rivnenska AES» DP «NAEK «Enerhoatom» na dovkillia za 2013–2022 [Report on Environmental Impact Assessment of Non-Radiation Factors of the Rivne NPP of the Energoatom Company for 2013–2022]. [Electronic resource] URL: <https://energoatom.gov.ua/wp-content/uploads//passport.pdf> (access date 05.11.2023) [in Ukrainian].

Kuznietsov, P.M. (2022). Biolohichne zabrudnennia ta ekolohe – utylitarni metody zmenshennia biolohichnykh pereshkod u systemi tekhnichnoho vodopostachannia elektrostantsii [Biological Pollution and Ecological-Utilitarian Methods of Reducing Biological Interference in the Technical Water Supply System of Power Plants]. Materialy tez dopovidei III Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia «Pryrodnychi nauky: proiekty, doslidzhennia, perspektyvy», K.: «Talkom». 176. [Electronic resource] URL: [http://dspace.luguniv.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/9537/1/fpn\\_zb\\_mater\\_3michn\\_konf2022.pdf#page=46](http://dspace.luguniv.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/9537/1/fpn_zb_mater_3michn_konf2022.pdf#page=46) (access date 05.11.2023) [in Ukrainian].

Kuznietsov, P.M., & Biedunkova, O.O. (2022). Porivnialnyi hidrobiolohichni monitorynh vod system tekhnichnoho vodopostachannia atomnykh elektrostantsii [Comparative hydrobiological monitoring of water in technical water supply systems of nuclear power plants]. *Vodni bioresursy ta akvakultura [Aquatic bioresources and aquaculture]*, 2(12). 180–190 [in Ukrainian].

Kuznietsov, P.M., & Biedunkova, O.O. (2023). Suchasni pidkhody do zdiisnennia antynakypnoi obrobky tekhnolohichnykh vod oborotnykh system okholodzhennia elektrostantsii [Modern

approaches to the implementation of antiscale treatment of process waters of circulating cooling systems of power plants]. Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnolohichnykh protsesiv ta system (KZlaTPS – 2023) : materialy tez dopovidei XIII Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (m. Chernihiv, 25–26 travnia 2023 r.) : u 2 t. / Natsionalnyi universytet «Chernihivska politekhnika» [ta in.] ; Chernihiv : NU «Chernihivska politekhnika», 2023. T. 2. s. 158–160. [Electronic resource] URL: <http://ir.stu.cn.ua/123456789/28099> (access date 05.11.2023) [in Ukrainian].

Poverkhnevi, pidzemni ta zvorotni vody [Surface water, groundwater, and recycled water]. Metodyka vymiriuvannia masovoi kontsentratsii sulfatuv tytrymetrychnym metodom [Method for measuring the mass concentration of sulfates by the titrimetric method]. MVV 081/12-0177-05. (2005). 29 p. [Electronic resource] URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=76457](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=76457) (access date 05.11.2023) [in Ukrainian].

Rozporiadzhennia Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 09.12.2022 № 1134-r [On approval of the Water Strategy of Ukraine for the period up to 2050 : Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine of 09.12.2022 No. 1134-r]. Pro skhvalennia Vodnoi stratehii Ukrainy na period do 2050 roku: (2022). [Electronic resource] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-%D1%80#Text> (access date 05.11.2023) [in Ukrainian].

Argüelles, R., Toledo, M., & Martín, M.A. (2021). Study of the Tagus River and Entrepeñas reservoir ecosystem around the Trillo nuclear power plant using chemometric analysis: Influence on water, sediments, algae and fish. *Chemosphere*. 279 (130532). <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130532> [in English].

Barker, J., Alyssa, J.F., & Pellerin, A. (2017). The Biogeochemical Sulfur Cycle of Marine Sediments. *Frontiers in Microbiology*. 10(5). <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00849> [in English].

Chen, M., Hong, X., He, Y., Song, N., Cai, H., Wang, C., Li, Y. T., Chu, H.Y., Krumholz, L.R., & Jiang, H.L. (2016). Increasing sulfate concentrations result in higher sulfide production and phosphorous mobilization in a shallow eutrophic freshwater lake, *Water Research*. 96(1), pp. 94–104. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.03.030> [in English].

GBC Government of British Columbia (2006). British Columbia approved water quality guidelines. Ministry of environment. Canada. Retrieved March 16, 2009, [Electronic resource] URL: [http://www.env.gov.bc.ca/wat/wq/BCguidelines/approv\\_wq\\_guide/approved.html](http://www.env.gov.bc.ca/wat/wq/BCguidelines/approv_wq_guide/approved.html) (access date 05.11.2023) [in English].

Kuznietsov, P., & Biedunkova, O. (2023). Study of Changes in Acid-Alkaline Balance of Cooling Water Circulating System of Power Plants during Water Treatment by Liming According to Stabilization Treatment Method, 4th International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering: Proceedings – June 26–29th, 2023, Lviv, Ukraine, pp. 239–241 <https://doi.org/10.23939/cte2023.239> [in English].

Little, B.J., Ray, R.I., & Pope, R.K. (2000). Relationship Between Corrosion and the Biological Sulfur Cycle: A Review. *Corrosion*, 2000. 56 (4), 433–443. <https://doi.org/10.5006/1.3280548> [in English].

Macknick, J., Newmark, R., Heath, G., & Hallett, K.C. (2012). Operational water consumption and withdrawal factors for electricity generating technologies: a review of existing literature. *Environmental Research Letters*. 7(4), pp. 045802. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/045802> [in English].

NHMRC. Australian drinking water guidelines. Retrieved March 16, 2004. [Electronic resource] URL: [http://www.nhmrc.gov.au/publications/synopses/\\_files/adwg\\_11\\_06\\_info\\_sheets.pdf](http://www.nhmrc.gov.au/publications/synopses/_files/adwg_11_06_info_sheets.pdf) (access date 05.11.2023) [in English].

Norboyev, K., Mukhtarov, F., & Zokhid, H.N. (2023). Usmonov Study of the influence of cooling water quality and inhibitors on the corrosion rate of brass in cooling water *E3S Web Conf.*, 434 01029 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202343401029> [in English].

Peterson, N.L. (1990). Drinking water and health. Sulphates in drinking water. *Water Sewage Works*. 55(143), pp. 425-428 [in English].

RAIS Risk Assessment Information System (1998). Toxicity profiles: Toxicity summary of sulphate. Retrieved March 16, 2009. [Electronic resource] URL: [http://rais.ornl.gov/tox/profiles/sulfate\\_f\\_V1.Shtml](http://rais.ornl.gov/tox/profiles/sulfate_f_V1.Shtml) (access date 05.11.2023) [in English].

SC090012/R2. (2011). Chemical discharges from nuclear power stations: historical releases and implications for Best Available Techniques Annex Report – SC090012/R2, Environment Agency, Horizon House, Deanery Road, [Electronic resource] URL: <https://www.environment-agency.gov.uk> (access date 05.11.2023) [in English].

Strategies to Reduce Sulfuric Acid Usage in Evaporative Cooling Water Systems. *Water*. (2010). [Electronic resource] URL: <https://www.powermag.com/strategies-to-reduce-sulfuric-acid-usage-in-evaporative-cooling-water-systems/> (access date 05.11.2023) [in English].

Sumita, D., Yadav, A., Dwivedi, P.D., & Das, M. (2015). Toxic hazards of leather industry and technologies to combat threat: a review, *Journal of Cleaner Production*. 87, pp. 39–49. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.017> [in English].

Universidad Austral de Chile (2005). Estudio sobre origen de mortalidades y disminución poblacional de aves acuáticas en el santuario de la naturaleza Carlos Anwandter, en la provincia de Valdivia. [Electronic resource] URL: <https://www.ceachile.cl/Cruces/PDF/25.%20Informe%20final%20UACH.pdf> (access date 05.11.2023) [in Spanish].

Wessa, P. (2023) Free Statistics Software, Office for Research Development and Education, ver. 1.2.1. [Electronic resource] URL: <https://www.wessa.net/> (access date 05.11.2023) [in English].

World Health Organisation (2004). Sulphate in drinking-water. Background document for development of WHO guidelines for drinking-water quality. [Electronic resource] URL: [https://cdn.who.int/media/docs/default-source/wash-documents/wash-chemicals/sulfate.pdf?sfvrsn=b944d584\\_4](https://cdn.who.int/media/docs/default-source/wash-documents/wash-chemicals/sulfate.pdf?sfvrsn=b944d584_4) (access date 05.11.2023) [in English].

Zak, D., Hupfer, M., Cabezas, A., Jurasinski, G., Audet, J., & Kleeberg, A., et al. (2021). Sulphate in freshwater ecosystems: A review of sources, biogeochemical cycles, ecotoxicological effects and bioremediation, *Earth-Science Reviews*, Volume 212 (103446). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103446> [in English].

Zhang, W., Ma, L., Jia, B., Zhang, Z., Liu, Y., & Duan, L. (2023). Optimization of the circulating cooling water mass flow in indirect dry cooling system of thermal power unit using artificial neural network based on genetic algorithm. *Applied Thermal Engineering*. 223(120040). <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120040> [in English].

Отримано: 13.11.2023  
Прийнято: 24.11.2023