

## ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНОГЕННИХ РИЗИКІВ ПРИ ВИКОРИСТАННІ РІЗНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ВОДООЧИЩЕННЯ

Інга Уряднікова<sup>1</sup>, Віктор Хоружий<sup>2</sup>, Тетяна Аргатенко<sup>3</sup>

Київський національний університет будівництва і архітектури  
31, Повітрофлотський пр., м. Київ, Україна, 03037

<sup>1</sup> канд. техн. наук, [uryadnikova.iv@knuba.edu.ua](mailto:uryadnikova.iv@knuba.edu.ua), [orcid.org/0000-0002-3750-876X](https://orcid.org/0000-0002-3750-876X)

<sup>2</sup> докт. техн. наук, [khoruzhyi.vp@knuba.edu.ua](mailto:khoruzhyi.vp@knuba.edu.ua), [orcid.org/0000-0002-5314-0483](https://orcid.org/0000-0002-5314-0483)

<sup>3</sup> канд. техн. наук, [argatenko.tv@knuba.edu.ua](mailto:argatenko.tv@knuba.edu.ua), [orcid.org/0000-0003-2516-2906](https://orcid.org/0000-0003-2516-2906)

DOI: 10.32347/2524-0021.2024.46.65-73

**Анотація.** В сучасних умовах забезпечення надійності та безпеки роботи систем водопостачання є першочерговим завданням для промислового господарства та безпеки життєдіяльності населення України. Постійне бомбардування і пошкодження об'єктів критичної інфраструктури, зокрема об'єктів водного господарства, ставлять під загрозу стабільність і якість водних ресурсів країни. У цьому контексті проведення досліджень з визначення техногенних ризиків в системах водоочищення при використанні різних технологій, а також розробка стратегій для підвищення надійності та безпеки експлуатації систем водопостачання стають актуальними для промислового сектору України. З метою підвищення надійності роботи блоків систем водоочищення та їх безпеки експлуатації були досліджені техногенні ризики при використанні технологій іонного обміну, електродіалізу та дистиляції води на підприємствах теплоенергетики. Показано, що при штатній роботі системи іонообмінного очищення води середньої продуктивності 400 м<sup>3</sup>/год в разі частих змін концентрації солей на вході ризик одержання недоочищеної води складає 0,0783. Цю величину необхідно враховувати для оцінки економічних і соціально-екологічних ризиків, оскільки вона перевищує загально прийняту величину 0,01. При використанні електродіалізного водоочищення та частих змінах концентрації солей на вході ризик одержання недоочищеної води складає 0,0271. Ця величина також більш як 0,01 ризику, прийнятого в якості припустимого. Технологія дистиляції води має достатній запас, щоб компенсувати будь-які відхилення при здійсненні процесу очищення, і дає дуже низький ризик. Проте, процес дистиляції ефективніший у видаленні лише розчинних домішок, тоді як у випадку завислих речовин, зокрема органічного походження, існує ризик виходу за межі 0,01.

**Ключові слова:** надійність, техногенні ризики, системи водопостачання, іонний обмін, електродіаліз, дистиляція, теплоенергетика.

### ВСТУП

В сучасних умовах забезпечення надійності та безпеки систем водопостачання є першочерговим завданням для промислового господарства і безпеки життєдіяльності населення України. Постійне бомбардування і пошкодження об'єктів критичної інфраструктури, зокрема об'єктів водного господарства, ставлять під загрозу стабільність і якість водних ресурсів країни. В цій ситуації забезпечення безпеки та надійності роботи

систем водопостачання стає не лише важливим, але й невідкладним завданням, що потребує комплексного підходу та системної реалізації заходів на різних рівнях управління. Більше того, проведення досліджень з визначення техногенних ризиків в системах водоочищення при використанні різних технологій, а також розробка стратегій для підвищення надійності і безпеки експлуатації систем водопостачання стають актуальними для промислового сектору України.

Як вже було досліджено і проаналізовано [1, 2], будь-яка система водоочищення може мати збої в роботі, що може бути пов'язано з природною інерційністю робочих процесів, зі зміною вихідних параметрів води, з коливаннями активності реагентів та іншими причинами. Однак, також необхідно дослідити похибки, що виникають при штатній роботі системи водоочищення та погіршують не лише показники якості води, але й безпеку довкілля.

Аналіз похибок можливий, якщо розглядати роботу системи водопідготовки як ланки єдиного робочого процесу. Це дає змогу досліджувати різні технології водоочищення і визначати ризики, що виникають при їх роботі.

**Метою** дослідження є визначення техногенних ризиків при штатній роботі блоків систем водоочищення з використанням технологій іонного обміну, електродіалізу та дистиляції на промислових виробництвах теплоенергетики для підвищення їх надійності і безпеки експлуатації.

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОЯСНЕННЯ

### 1. Дослідження техногенних ризиків при використанні технології іонного обміну

Метод іонного обміну – традиційно використовуваний метод пом'якшення та хімічного знесолення вод в теплоенергетиці.

Попередньо підготовлена вода фільтрується через промислові фільтри, завантажені іонітами. У спрощеному вигляді процес іонування можна представити наступним чином. В іонному обміні іони певного заряду з розчину адсорбуються на тверду речовину (іоніт) і замінюються еквівалентними кількостями інших іонів того ж знаку заряду, що віддаються іонітом. Іоніти являють собою нерозчинні у воді речовини, що містять іоногенні групи, здатні до обміну іонами з зовнішнім розчином. Іоногенні групи іонітів можуть мати сольову, кислотну або основну форму. Залежно від знака заряду обмінюваних іонів іоніти поділяють на катіоніти та аніоніти.

Для видалення з води катіонів застосовуються катіоніти, що знаходяться в Н-, Na- або NH<sub>4</sub>- формі. Очищення води від аніонів

роблять за допомогою аніонітів, що знаходяться в OH-, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> чи Cl- формі. Процес очищення води на катіоніті називається катіонуванням. При Н-катіонуванні відбувається обмін усіх катіонів, що знаходяться у воді на іон Н<sup>+</sup>, який знаходиться в катіоніті. Процес очищення води на аніоніті називається аніонуванням. При аніонуванні відбувається обмін аніонів, що містяться у воді на аніон, який знаходиться в аніоніті. Найбільш часто для очищення води від аніонів застосовують аніоніт у OH-формі, при цьому в загальному випадку відбувається обмін всіх аніонів з води, що очищується, на аніон OH<sup>-</sup>.

На катіоніті в Na- формі відбувається обмін іонів Ca<sup>2+</sup> і Mg<sup>2+</sup> на еквівалентну кількість іонів Na<sup>+</sup>, в результаті у фільтраті замість солей жорсткості утворюються натрієві солі. При використанні комбінації Н-катіоніта й OH-аніоніта всі іони видаляються і замінюються водою, фільтрат стає демінералізованим.

Найчастіше застосовують дві схеми включення іонітових фільтрів: рівнобіжну – для однофункціональних іонітових фільтрів і блокову – для різнофункціональних іонітових фільтрів. У першому випадку вихідна вода подається на кожен одноіменний іонітовий фільтр із загального колектора, а фільтрат збирають після кожного з цих фільтрів у самостійний колектор. В другому випадку до складу кожного блоку включають по одному фільтру відповідної ступені, з'єднаних послідовно.

Принципова схема іонообмінної установки [3,4] являє собою іонітовий фільтр, з'єднаний з деаератором (рис. 1).



**Рис.1.** Схема установки іонообмінної водоочистки: 1 – іонітовий фільтр, 2 – деаератор

**Fig. 1.** Scheme of installation of ion-exchange water treatment: 1 – ion exchange filter, 2 – deaerator

Рівняння динаміки роботи іонітового фільтра подібне до рівняння динаміки роботи механічного фільтра, і в об'ємних одиницях має вигляд:

$$V_k(t) = V_0(t - \tau), \quad (1)$$

де  $V_0$  і  $V_k$  – відповідно, початкова та кінцева маса забруднювача,  $\tau$  – час запізнювання.

Передатна функція цієї ланки, тобто відношення кінцевої величини до початкової, представлено в операторній формі [5,6]:

$$W(p) = e^{-p\tau}, \quad (2)$$

де  $p$  – комплексна змінна, використовувана в перетвореннях Лапласа.

Зміна концентрації розчинних домішок після фільтра описується системою рівнянь [5, 6]:

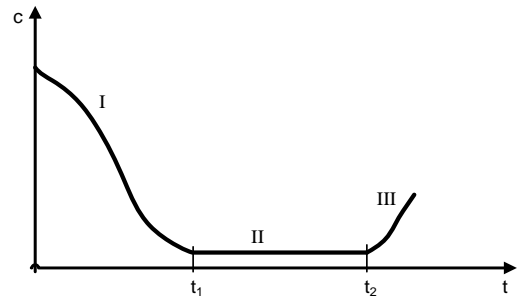
$$\begin{aligned} \omega_{an} \frac{\partial C_j}{\partial x} + \varepsilon \frac{\partial C_j}{\partial t} + \frac{\partial q_j}{\partial t} &= 0; \\ \frac{\partial q}{\partial t} &= \beta(C_j - C_j^*); \\ q_j &= f(C_j^*). \end{aligned} \quad (3)$$

Рішення цієї системи відносно часу роботи фільтра приведено в роботах [5, 6]. Це рішення, наприклад, для Na-катионітового фільтра має вигляд:

$$t = \frac{x}{\omega_{an} \cdot h} + \frac{\ln \varphi_{j+1}}{0,92 \omega_{an}^{0,5} d^{-1,5} h^{0,5}}. \quad (4)$$

У цих рівняннях  $\omega_{an}$  – швидкість проходження води через фільтр;  $C_j$  – відносна концентрація іонів виду  $j$  у розчині;  $\varepsilon$  – пористість шару іоніту;  $q_j$  – миттєва обмінна концентрація іоніту;  $\beta$  – коефіцієнт масопереносу;  $C_j^*$  – відносна концентрація іонів виду  $j$  у розчині через проміжок часу  $\partial t$ ;  $t$  – час роботи фільтра;  $d$  – діаметр зерна іонітів;  $h$  – розподільне співвідношення  $h = C_0/q_0$ , де  $C_0$  – загальна концентрація іонів у воді, що надходить у фільтр;  $q_0$  – повна об'ємна ємність іоніту;  $x$  – висота завантаження іоніту;  $\varphi_j$  – відносна концентрація іона, що визначається, у фільтраті  $C_j^* = C_j/C_0$ .

Використовуючи вирази (1, 2), можна побудувати криві залежності концентрації іонів розчинних домішок у фільтраті. Типова залежність показана на рис. 2 [3-6].



**Рис. 2.** Залежність концентрації солей жорсткості у фільтраті від часу роботи Na-катионітового фільтра

**Fig. 2.** Dependence of the concentration of hardness salts in the filtrate on the operating time of the Na-cationite filter

Позначення на рис. 2: I – ділянка кривої, на якій відбувається зниження концентрації солей жорсткості у воді, що очищується; II – ділянка сталої роботи, коли відбувається максимальне зниження концентрації солей жорсткості відповідно до параметрів фільтра; III – ділянка кривої, коли фільтр втратив інообмінну здатність і концентрація розчинних домішок на виході підвищується, а при продовженні роботи може зрівнятися з вихідною.

Для аналізу необхідно розглядати ділянки I і II чи проміжки часу  $t_1$  і  $t_2$ , коли відбувається зниження концентрації домішок до припустимого рівня. Таким чином, якщо час роботи фільтра  $t > t_2$ , то на виході фільтра з'являється недоочищена чи неочищена вода. Отже, ризик одержання неочищеної води полягає в проміжку часу  $t_2$ , який можна визначити за виразом [4]:

$$t_2 = \frac{f h_{ш} E n}{Q C}, \quad (5)$$

де  $f$  – площа одного фільтра,  $h_{ш}$  – висота шару іоніту у фільтрі,  $E$  – робоча ємність,  $n$  – кількість фільтрів, необхідних для очищення заданого обсягу води,  $Q$  – розрахункова продуктивність системи водоочищення,  $C$  – концентрація домішок у воді на вході фільтра.

Як видно з останнього виразу  $t_2$  зменшується при збільшенні  $Q$  понад розраховану величину й у випадку збільшення концентрації домішок на вході.

Нормальний режим експлуатації іонітових фільтрів передбачає тривалість робочої

стадії близько 12–24 годин. Контроль фільтрату у залежності від обраної технологічної схеми здійснюється кожні 4–6 годин.

Збільшення концентрації домішок на вході до іонітового фільтра може бути результатом паводків, дощів, танення снігу, а також аварій і несанкціонованих скидань у водне джерело забруднюючих речовин.

Збільшення концентрації розчинених домішок також може бути викликано підвищенням температури води на вході системи водоочищення через погодні умови.

$$P_{\text{заг}} = P(A + B + C) = P(A) + P(B) + P(C) - P(A \cdot B \cdot C). \quad (6)$$

Якщо за рекомендаціями [7-9] прийняти  $P(A) = 0,0274$ ;  $P(B) = 0,05$  і  $P(C) = 0,001$ , одержуємо загальну імовірність чи ризик одержання недоочищеної води 0,0783.

Якщо є система водоочищення, що складається з 3-іонітних фільтрів, загальною продуктивністю 400 м<sup>3</sup>/год чи 133,3 м<sup>3</sup>/год на один фільтр, то за умови, що тривалість роботи фільтра складе 24 год, а виміри концентрації виконуються кожні 4 год, максимальне надходження неочищеної чи недоочищеної води може скласти 533 м<sup>3</sup>. Виходячи з отриманої імовірності, кількість таких випадків становитиме близько 29 на рік. У такий спосіб річний обсяг некондиційної води може скласти 15457 м<sup>3</sup>/рік. Це значна величина, яку необхідно враховувати для оцінки економічних і соціально-екологічних ризиків.

## 2. Дослідження техногенних ризиків при використанні технології електродіалізу

Електродіаліз являє процес видалення іонів солей із води, що здійснюється в багатокамерному мембранному апараті (електродіалізаторі) під дією постійного електричного поля.

Технологія ґрунтується на тому, що у випадку поділу пористою перегородкою розчинів двох солей різних концентрацій виникає різниця потенціалів, яка має вигляд [3, 4, 9]:

$$\Delta E = \frac{RT}{zF} \ln \frac{C_1}{C_2}, \quad (7)$$

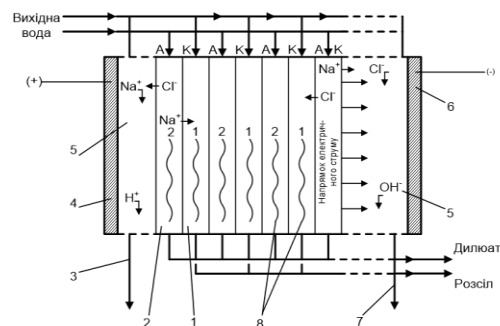
де  $R$  – універсальна газова постійна,  $T$  – температура,  $z$  – заряд іонів в електронних одиницях,  $F$  – число Фарадея. Під дією

Збільшення обсягу води, що подається на фільтр, може бути викликано раптовою зупинкою якого-небудь з рівнобіжних фільтрів, що може бути викликано аварією чи помилкою персоналу.

Позначимо імовірності здійснення цих подій як  $P(A)$ ,  $P(B)$  і  $P(C)$ . Імовірності появи цих подій є спільними, тоді загальна імовірність ризику одержання неочищеної чи недоочищеної води буде:

градієнта концентрацій іони солі з більшою концентрацією дифундують через пористу перегородку в розчин з меншою концентрацією. Для того, щоб перенести іони з розчину з меншою концентрацією в розчин з більшою концентрацією проти градієнта концентрації необхідно прикласти різницю потенціалів  $\Delta E_1 > \Delta E$ .

Електродіалізний апарат рис. 3 [4, 9] розділяють на камери аніоно- та катіонообмінними мембранами А і К, що чергуються на відстані 0,5...1,5 мм. Аніони переміщуються крізь аніонообмінні мембрани до аноду (4), а катіони переміщуються крізь катіонообмінні мембрани в напрямку катоду (6). У ділюатних камерах 2 відбувається знесолення, а в розсільних камерах відбувається концентрування розчину.



**Рис. 3.** Схема електродіалізного апарата: 1 – розсільна камера, 2 – ділюатна камера, 3 – відвід аноліту, 4 – анод, 5 – приелектродна камера, 6 – катод, 7 – відвід католіту, 8 – прокладки

**Fig. 3.** Scheme of the electro dialysis apparatus: 1 – concentrate chamber, 2 – diluate chamber, 3 – anolyte outlet, 4 – anode, 5 – near-electrode chamber, 6 – cathode, 7 – catholyte outlet, 8 – gaskets

Найбільший вплив на процес знесолення мають довжина апарату, відстань між мембранами, початкова концентрація ділюату та щільність струму.

Зміна концентрації ділюату при проходженні розчину вздовж осередку від входу до виходу описується рівнянням [3,4]:

$$\frac{dC}{dl} = \frac{i(l)\eta}{Fvd_d}, \quad (8)$$

де  $C$  – поточна концентрація ділюату,  $l$  – довжина камери,  $i(l)$  – щільність струму в точці  $l_i$  по довжині камери,  $F$  – площа мембрани,  $v$  – швидкість руху рідини в осередку,  $d_d$  – ширина ділюатної камери.

Якщо перейти до тимчасових координат, вважаючи рух рідини рівномірним, то можна одержати вираз:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{i(l)\eta}{Fd_d}, \quad (9)$$

де  $t$  – поточний час проходження рідини через камеру.

Приймаючи середню щільність струму постійною, можна стверджувати, що концентрації очищеного розчину на вході і на виході камери діалізатора являють собою диференціюючу ланку з передатною функцією

$$W(p) = kp. \quad (10)$$

Виходячи з прийнятої середньої щільності струму, можна одержати вираз для концентрації ділюату залежно від технологічних параметрів процесу. Згідно [3,4] маємо:

$$Y_K = 1 - \frac{i_c \cdot \eta \cdot L}{F \cdot v \cdot d}, \quad (11)$$

де  $Y_K$  – кінцева відносна концентрація ділюату на виході з апарату,  $i_c$  – середня щільність струму,  $\eta$  – ККД,  $L$  – довжина апарату,  $F$  – площа пластини,  $v$  – швидкість рідини,  $d$  – ширина ділюатної камери.

Більш простий вираз може бути отриманий шляхом перетворення залежностей [4], де використовується сила і час проходження струму.

$$C_K = C_n - \frac{I \cdot \tau \cdot \eta}{26,8 \cdot Q}, \quad (12)$$

де  $C_n$  – початкова концентрація розчину,  $C_K$  – кінцева концентрація розчину на виході з

осередку,  $I$  – сила струму,  $\tau$  – час дії струму,  $\eta$  – ККД,  $Q$  – продуктивність апарату.

Розглядаючи отримані вирази можна зробити висновок, що на кінцеву концентрацію  $C_K$  впливає зміна початкової концентрації  $C_n$ , сила струму  $I$  і підвищення  $Q$  понад розрахункове значення. Нас цікавлять можливі зміни сили струму при штатній роботі цієї системи. Такі зміни можуть відбутися через зміну температури розчину, швидкості потоку, зміни концентрації розчину і складу розчину.

Перетворюючи дані, що приведені в [4] можна одержати залежність сили струму від зміни температури:

$$I = \frac{U}{p_0 \cdot e^{-\frac{A}{RT}}}, \quad (13)$$

де  $U$  – напруга, яка подається на апарат,  $p_0$  – опір при визначеній температурі  $T_0$ ,  $A$  – енергія активації,  $T$  – поточна температура розчину.

Сила струму, згідно [3,4,9] на границі розчин-пластина буде описуватися емпіричною залежністю:

$$I = K \cdot v^n \cdot S, \quad (14)$$

де  $K$  і  $n$  – величини, обумовлені експериментально,  $v$  – швидкість розчину,  $S$  – площа мембрани.

У загальному випадку можна записати, що

$$I = f(C_n, \rho, v, T, pH, Q). \quad (15)$$

У такий спосіб імовірність появи на виході апарата некондиційної води  $P_{\text{неконд}}$  включає:  $P_{C_n}$  – імовірність зміни концентрації на вході;  $P_I$  – імовірність зміни сили струму;  $P_Q$  – імовірність надходження на апарат обсягу води більше розрахункового.

Імовірності цих подій є спільними, тому можна записати:

$$P_{\text{неконд}} = P_{C_n} + P_I + P_Q - P(P_{C_n} \cdot P_I \cdot P_Q). \quad (16)$$

Імовірності подій, що визначають зміну сили струму, також є спільними, тому

$$P_I = P_{C_n} + P_C + P_v + P_T + P_p + P_Q - P(P_{C_n} \cdot P_C \cdot P_v \cdot P_T \cdot P_p \cdot P_Q). \quad (17)$$

Поєднуючи ці вирази одержуємо:

$$P_{\text{неконд}} = P_{C_{\text{п}}} + [P_{C_{\text{п}}} + P_C + P_v + P_T + P_p + P_Q - P(P_{C_{\text{п}}} \cdot P_C \cdot P_v \cdot P_T \cdot P_p \cdot P_Q)] + P_Q - P(P_{C_{\text{п}}} \cdot [P_{C_{\text{п}}} + P_C + P_v + P_T + P_p + P_Q - P(P_{C_{\text{п}}} \cdot P_C \cdot P_v \cdot P_T \cdot P_p \cdot P_Q)] \cdot P_Q). \quad (18)$$

Використовуючи дані попередніх досліджень, а також дані джерел [4,9], можна розрахувати цю імовірність, що дорівнює 0,0271. Це означає, що така ситуація може створюватися біля 10 разів на рік. Якщо прийняти, що виміри концентрації на виході роблять кожні 24 год, то максимальний час, протягом якого некондиційна вода надходить на вихід складе 240 год. Якщо продуктивність електродіалізної установки складає 4,16 м<sup>3</sup>/год, то при роботі такої установки ймовірно одержання 998 м<sup>3</sup> некондиційної води на рік.

### 3. Дослідження техногенних ризиків в технології дистиляції

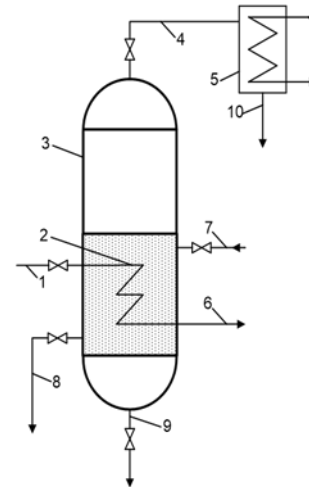
Метод дистиляції є дуже поширеним при опрісненні води з високим солевмістом. Зазначений метод використовується як для одержання прісної води, так і для переробки високомінералізованих вод з метою очищення їх від надлишкових мінералів.

Цей процес ґрунтується на тому, що при нагріванні водяних розчинів молекули води здобувають енергію, що перевищує сили молекулярного тяжіння і виносяться в паровий простір. Іони і молекули розчинених речовин, що містяться у воді в гідратованому стані, такого запасу енергії не мають і переходять у пару в незначній кількості.

Дистиляція чи термічне знесолення води здійснюється на установках, що працюють за схемою, показаною на рис. 4 [4].

В установках такого типу вода за рахунок одержання теплоти від підведеної в нагрівач первинної пари перетворюється у вторинну пару, що потім конденсується. Речовини, що забруднюють воду, видаляються з випарника підведеною продувною водою. Дистиллят – конденсат вторинної пари, містить лише незначну кількість летких домішок, що надходять у нього за рахунок краплиного винесення речовини водою, що випаровується.

Рівняння матеріального балансу випарника, складене за умови, що перехід



**Рис. 4.** Принципова схема випарної установки: 1 – лінія підведення первинної пари, 2 – секція випарника, 3 – корпус випарника, 4 – лінія відводу пари, що утвориться, 5 – конденсатор, 6 – лінія відведення конденсату первинної пари, 7 – лінія підведення живильної води, 8 – лінія продувки, 9 – лінія спорожнювання, 10 – лінія відводу дистиляту

**Fig. 4.** Schematic diagram of the evaporator: 1 – primary steam supply line, 2 – evaporator section, 3 – evaporator body, 4 – steam outlet line, 5 – condenser, 6 – primary steam condensate outlet line, 7 – feed supply line water, 8 – purging line, 9 – emptying line, 10 – distillate withdrawal line

домішок у вторинну пару дорівнює нулю, приведене у роботах [9-12] і має вигляд:

$$C_{\text{в.в}}/C_{\text{ж.в}} = (p_v + p_{\text{пр}})/p_{\text{пр}}, \quad (19)$$

де  $C_{\text{в.в}}$  – концентрація домішок у воді випарника,  $C_{\text{ж.в}}$  – концентрація домішок у живильній воді,  $p_v$  – продуктивність випарника,  $p_{\text{пр}}$  – продуктивність продувки.

Якщо прийняти розмір продувки рівним 1% і менше, то можна розрахувати, що концентрація домішок у воді випарника може бути на кілька порядків вище, ніж концентрація домішок у живильній воді.

Це означає, що концентрація домішок у дистиляті стосовно води, що очищується складатиме  $10^{-2} \dots 10^{-4}$ .

Можна зробити висновок, що метод дистиляції має достатній запас, щоб компенсувати будь-які відхилення при здійсненні процесу очищення у штатному режимі і дає зневажаємо малий ризик.

**4. Сумарний техногенний ризик в системах водоочищення підприємств теплоенергетики**

При роботі систем водоочищення підприємств теплоенергетики виникають різноманітні техногенні ризики, які погіршують стан екологічної безпеки.

Причинами цих ризиків є відмови блоків і елементів систем водоочищення, часткові відмови, нештатна робота систем водоочищення і ризики при штатній роботі систем водоочищення. Отже, можна визначити такі ймовірнісні ризики:

$$P(R_{\text{сум}}) = P(R_{\text{відмов}} + R_{\text{нештатна}} + R_{\text{штатна}}) = P(R_{\text{відмов}}) + P(R_{\text{нештатна}}) + P(R_{\text{штатна}}) - P(R_{\text{відмов}} \cdot R_{\text{нештатна}}) - P(R_{\text{відмов}} \cdot R_{\text{штатна}}) - P(R_{\text{нештатна}} \cdot R_{\text{штатна}}) - P(R_{\text{відмов}} \cdot R_{\text{нештатна}} \cdot R_{\text{штатна}}). \tag{20}$$

Таким чином, можна стверджувати, що значна кількість методів водоочищення при роботі у штатному режимі мають ризики за певних обставин, недоочищувати воду. Аналіз досліджень і розрахунки за виразом (20) показують, що у дійсний час, більша частина систем водоочищення може реалізовувати

$P(R_{\text{відмов}})$  – ймовірність ризику, що викликаний відмовами блоків і елементів систем водоочистки;

$P(R_{\text{нештатна}})$  – ймовірність ризику, який викликаний частковими відмовами блоків і елементів систем водоочистки;

$P(R_{\text{штатна}})$  – ймовірність ризику, який реалізується при штатній роботі систем водоочистки внаслідок фізико-хімічних принципів, на яких вони працюють.

Ці ймовірнісні події є сумісними, бо реалізація однієї події не виключає реалізації інших.

Сумарна ймовірність цих подій, якщо використати повну теорему додатку сумісних подій, буде:

ризиків ймовірності 0,03. Розрахунок часу надходження неочищеної води на вихід системи становить 2,5...3 %.

Зведені результати аналізу ризиків при водоочищенні на підприємствах теплоенергетики представлені в табл.1.

**Табл. 1.** Функціональні залежності та ризик найбільш використовуваних технологій очищення води в теплоенергетиці при їх штатній роботі

**Table 1.** Functional dependencies and risk of the most used water purification technologies in thermal energy during their regular operation

№ п/п	Технології очистки води	Функціональні залежності	Ризик
1	Технологія іонного обміну	$V_k(t) = V_0(t - \tau)$	0,0783
2	Технологія електродіалізу	$\Delta E = \frac{RT}{zF} \ln \frac{C_1}{C_2}$	0,0271
3	Технологія дистиляції	$C_{в.в}/C_{ж.в} = (p_v + p_{пр})/p_{пр}$	0,001

**ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ**

1. При роботі систем водоочищення підприємств теплоенергетики виникають різноманітні техногенні ризики, які погіршують екологічний стан довкілля. Причинами цих ризиків є відмови блоків і елементів систем

водоочищення, часткові відмови, нештатна робота систем водоочищення та ризики при штатній роботі систем водоочищення внаслідок фізико-хімічних принципів, на яких вони працюють.

2. При досить частій зміні концентрації води на вході частка забрудненої води при

роботі установки іонітного водоочищення в штатному режимі, може бути досить велика, що пов'язано з природою процесів, що відбуваються в іонітовому фільтрі.

3. Згідно з результатами аналізу можна стверджувати, що при штатній роботі системи іонообмінного водоочищення, при досить частих змінах концентрації на вході (що в більшості випадків відповідає дійсності) ризик одержання недоочищеної води для системи іонітового водоочищення середньої продуктивності 400 м<sup>3</sup>/год, складає 0,0783. Цю величину необхідно враховувати для оцінки економічних і соціально-екологічних ризиків, оскільки вона перевищує прийнятну величину 0,01.

4. При зміні концентрації води на вході частка забрудненої води при роботі установки електродіалізного водоочищення в штатному режимі може бути досить великою, що пов'язано з умовами роботи установок.

5. Результати аналізу показують, що при штатній роботі системи електродіалізного водоочищення, при досить частих змінах концентрації на вході (що в більшості випадків відповідає дійсності) ризик одержання недоочищеної води складає 0,0271. Ця величина також більше 0,01 ризику, прийнятого в якості припустимого.

6. Метод дистиляції має достатній запас, щоб компенсувати будь-які відхилення при здійсненні процесу очищення у штатному режимі і процес дистиляції дає дуже малий ризик. Однак, процес дистиляції більш придатний для очистки води тільки від розчинних домішок. Що стосується завислих домішок органічного походження, то при цьому можливий вихід за межі 0,01 ризику.

7. Узагальнюючи результати аналізу різних методів водоочищення визначено, що навіть у штатному режимі роботи при деяких збуреннях в системах кількість забрудненої води може вийти за межі, що передбачено нормативними вимогами.

8. Розрахунки та аналіз показують, що більша частина систем водоочищення може реалізовувати ризики ймовірністю 0,03 з часом надходження неочищеної води на вихід системи 2,5...3% від часу експлуатації.

## ЛІТЕРАТУРА

1. **Уряднікова І. В.** Аналіз і визначення техногенних ризиків при штатній роботі у процесі водоочищення методом реагентної коагуляції і електрокоагуляції // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. Кременчук, 2020. №5-6, С. 124-125.
2. **Уряднікова І. В.** Визначення техногенних ризиків в перехідних станах при експлуатації систем водоочищення в теплоенергетиці // Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. Львів, 2021. № 23. С. 11-19.
3. **Кульський Л. А.** Теоретические основы и технология кондиционирования воды. Київ: Наукова думка, 1983. 528 с.
4. **Запольський А. К., Мішкова-Клименко Н.А., Астрелін І. М., Брик М.Т., Гвоздяк П. І., Князькова Т. В.** Фізико-хімічні основи технології очищення стічних вод. Київ: Лібра, 2000. 552 с.
5. **Проников А. С.** Надежность машин. Москва: Машиностроение, 1978. 592 с.
6. **Клюев А. С.** Автоматическое регулирование. изд. 2-е, перераб. и доп. Москва: Энергия, 1973. 391 с.
7. **Абрамов Н. Н.** Надежность систем водоснабжения: 2-е изд. (Надежность и качество). Москва: Стройиздат, 1984. 216 с.
8. **Абрамов Н. Н.** Теория и методика расчета систем подачи и распределения воды. Москва: Стройиздат, 1972. 286 с.
9. **НДР** «Дослідження з обґрунтування комп'ютерних моделей та програмно-апаратного комплексу для оцінювання ризиків та загроз виникнення надзвичайних ситуацій на об'єктах критичної інфраструктури із застосуванням геоінформаційних технологій» («Модель Геоінформ Ризик НС») ОИЧ У 007224 Міністерства внутрішніх справ (2014-2016).
10. **Громогласов А. А., Копылов А. С., Пильщиков А. П.** Водоподготовка: Процессы и аппараты/под ред. Мартыновой О.И. Москва: Энерго-атомиздат, 1990. 272 с.
11. **Белоконова А. Ф.** Водно-химические режимы тепловых электростанций. Москва: Энергоатомиздат, 1985. 201 с.
12. **Кострикин Ю. М., Мещерский Н. А., Коровина О. В.** Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления: справочник. Москва: Энергоатомиздат, 1990. 254 с.



## REFERENCES

1. **Uriadnikova, I. V. (2020).** Analiz i vyznachennia tekhnohennykh ryzykiv pry shtatnii roboti u protsesi vodoochyshchennia metodom reahentnoi koahuliatsii i elektrokoahuliatsii. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho*, 5-6, 124-125. [in Ukrainian].
2. **Uriadnikova, I. V. (2021).** Vyznachennia tekhnohennykh ryzykiv v perekhidnykh stanakh pry ekspluatatsii system vodoochyshchennia v teploenerhetytsi. *Visnyk Lvivskoho derzhavnoho universytetu bezpeky zhyttiediialnosti*, 23, 11-19. [in Ukrainian].
3. **Kulskij, L. A. (1983).** *Teoreticheskie osnovy i tehnologiya kondicionirovaniya vody*. Kyiv: Naukova dumka. [in Russian].
4. **Zapolskyi A. K., Mishkova-Klymenko N.A., Astrelin I. M., Bryk M.T., Hvozdiak P. I., & Kniazkova, T. V. (2000).** *Fyzyko-khimichni osnovy tekhnolohii ochyshchennia stichnykh vod*. Kyiv: Libra. [in Ukrainian].
5. **Pronikov, A. S. (1978).** *Nadezhnost mashin*. Moskva: Mashinostroenie. [in Russian].
6. **Klyuev, A. S. (1973).** *Avtomaticheskoe regulirovanie*. Moskva: Energiya. [in Russian].
7. **Abramov, N. N. (1984).** *Nadezhnost sistem vodosnabzheniya (Nadezhnost i kachestvo)*. Moskva: Strojizdat. [in Russian].
8. **Abramov, N. N. (1972).** *Teoriya i metodika rascheta sistem podachi i raspredeleniya vody*. Moskva: Strojizdat. [in Russian].
9. **SRW (2014-2016).** Study on the substantiation of computer models and software and hardware complex for assessing risks and threats of emergency situations at critical infrastructure facilities using geo-information technologies («Geoinform Emergency Risk Model») State registration number OICH U 007224 of the Ministry of Internal Affairs. [in Ukrainian].
10. **Gromoglasov, A. A., Kopylov, A. S., & Pilshikov, A. P. (1990).** *Vodopodgotovka: Processy i apparaty*. Moskva: Energo-atomizdat. [in Russian].
11. **Belokonova, A. F. (1985).** *Vodno-himicheskie rezhimy teplykh elektrostancij*. Moskva: Energoatomizdat. [in Russian].
12. **Kostrikin, Yu. M., Mesherskij, N. A., & Korovina, O. V. (1990).** *Vodopodgotovka i vodnyj rezhim energoobektov nizkogo i srednego davleniya: spravochnik*. Moskva: Energoatomizdat. [in Russian].

## Determination of technogenic risks when using various water purification technologies

Inga Uriadnikova, Victor Khoruzhy, Tetiana Arhatenko

**Abstract.** In modern conditions, ensuring the reliability and safety of water supply systems is a primary task for the industrial economy and the safety of life of the population of Ukraine. Constant bombing and damage to critical infrastructure facilities, including water management facilities, endangers the stability and quality of the country's water resources. In this context, conducting research on the identification of man-made risks in water treatment systems using various technologies, as well as developing strategies to increase the reliability and safety of operation of water supply systems are becoming relevant for the industrial sector of Ukraine. In order to increase the reliability of water treatment units and their operational safety, man-made risks were investigated when using ion exchange, electro dialysis, and water distillation technologies at thermal power plants. It is shown that during normal operation of the ion-exchange water purification system with an average productivity of 400 m<sup>3</sup>/h, in the case of frequent changes in the concentration of salts at the inlet, the risk of receiving underpurified water is 0.0783. This value must be taken into account for the assessment of economic and social-ecological risks, since it exceeds the generally accepted value of 0.01. When using electro dialysis water purification and frequent changes in the concentration of salts at the inlet, the risk of receiving underpurified water is 0.0271. This value is also greater than 0.01 risk accepted as acceptable. The water distillation technology has enough margin to compensate for any deviations in the purification process and gives a very low risk. However, the distillation process is more effective in removing only soluble impurities, while in the case of suspended substances, in particular of organic origin, there is a risk of exceeding the limit of 0.01.

**Key words:** reliability, technogenic risks, water supply systems, ion exchange, electro dialysis, distillation, thermal power engineering.

Стаття надійшла до редакції 15.03.2024