

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ НАДІЙНОСТІ, РИЗИКІВ І БЕЗПЕКИ СИСТЕМ ВОДООЧИЩЕННЯ

Інга Уряднікова

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

канд. техн. наук, uryadnikova.iv@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0002-3750-876X

DOI: 10.32347/2524-0021.2025.49.85-93

Анотація. На сьогодні, системи водоочиснення на теплоенергетичних виробництвах є невіддільною частиною технологічного процесу, оскільки якість підготовленої води безпосередньо впливає на ефективність роботи котельного та теплообмінного обладнання. Вода, що використовується в теплоенергетиці, повинна відповідати жорстким нормативним вимогам, оскільки навіть незначні відхилення можуть призвести до корозії металевих поверхонь, утворення накипу та зменшення теплообмінної ефективності. З метою дослідження аналізу взаємозв'язку між надійністю, ризиками та безпекою експлуатації водоочисного обладнання теплоенергетичних виробництв, запропоновано розробити математичні моделі для оцінки надійності систем водоочиснення на теплоенергетичних виробництвах, що дозволить формалізувати процеси виникнення відмов, їхнього усунення та впливу на стабільність і ефективність роботи водоочисного обладнання. Аналіз отриманих результатів показав, що використання математичних моделей дозволяє не лише кількісно оцінити надійність систем водоочиснення на теплоенергетичних виробництвах, а й виявити закономірності, що визначають їхню довговічність, стабільність роботи та рівень безпеки. Розрахунки підтвердили, що існує тісний взаємозв'язок між ймовірністю безвідмовної роботи, інтенсивністю відмов, середнім часом безвідмовної експлуатації та ефективністю функціонування системи загалом. Отримані результати свідчать про те, що значне зниження ризиків аварійних ситуацій може бути досягнуте шляхом підвищення швидкості відновлення обладнання, що безпосередньо впливає на зменшення часу простою, що своєю чергою сприяє підвищенню загальної ефективності роботи системи, зменшенню втрат води та енергоресурсів, а також мінімізації негативного впливу на виробничий процес. Дослідження також підтвердило, що взаємозв'язок між надійністю, ризиками та безпекою системи має суттєвий вплив на її експлуатаційні характеристики. Зокрема, системи з вищим рівнем надійності демонструють меншу ймовірність відмов, що позитивно позначається на загальній ефективності роботи теплоенергетичних підприємств. Запропоновані математичні вирази дозволяють прогнозувати працездатність обладнання за певний проміжок часу, оцінювати вплив змінних параметрів на стійкість системи та приймати обґрунтовані рішення щодо її вдосконалення. Проведений аналіз підтвердив ефективність застосування математичних методів для оцінки надійності та безпеки систем водоочиснення.

Ключові слова: безпека, надійність, техногенні ризики, системи водоочиснення, теплоенергетика.

ВСТУП

У сучасному світі, де технологічний прогрес нерозривно пов'язаний з підвищенням складності інженерних систем, забезпечення їх безпечного та надійного функціонування стає завданням першочергової

важливості. Особливо це стосується критично важливих інфраструктур, таких як системи водопостачання, енергетики, транспорту та промислові комплекси, де потенційні аварії можуть мати катастрофічні наслідки для суспільства та довкілля. Для ефективного управління безпекою таких складних

систем необхідний комплексний підхід, що базується на інтеграції методів аналізу безпеки, ризику та надійності. Ці методи не є ізольованими, а навпаки, тісно взаємопов'язані та доповнюють один одного, утворюючи єдину систему, спрямовану на мінімізацію потенційних небезпек та забезпечення стабільного функціонування.

Аналіз безпеки є першим кроком у цьому процесі. Він спрямований на систематичне виявлення та оцінку потенційних небезпек, які можуть виникнути в процесі експлуатації системи. Це включає в себе аналіз технічних характеристик обладнання, технологічних процесів, людського фактору та зовнішніх впливів. Результатом аналізу безпеки є ідентифікація можливих сценаріїв аварій та визначення їх потенційних наслідків.

Аналіз ризику є наступним етапом, який дозволяє кількісно оцінити ймовірність виникнення ідентифікованих небезпек та їх потенційні наслідки. Він базується на використанні математичних моделей та статистичних методів для розрахунку ризику, який визначається як добуток ймовірності події на її наслідки. Аналіз ризику дозволяє визначити пріоритетні напрямки для впровадження заходів з мінімізації ризику.

Аналіз надійності, у свою чергу, спрямований на оцінку здатності системи виконувати свої функції без відмов протягом заданого періоду часу. Він базується на використанні статистичних методів для аналізу даних про відмови обладнання та визначення показників надійності. Аналіз надійності дозволяє визначити слабкі місця системи та розробити заходи для підвищення її надійності.

Взаємозв'язок між цими методами полягає в тому, що результати аналізу безпеки є вхідними даними для аналізу ризику, а результати аналізу надійності використовуються для оцінки ймовірності виникнення аварій. Комплексне застосування цих методів дозволяє не лише запобігти аваріям, але й мінімізувати їх наслідки, забезпечуючи стабільне та безпечне функціонування критично важливих систем.

В даній роботі представлені загальні математичні підходи до визначення

взаємозв'язку надійності, ризиків та безпеки систем водоочищення теплоенергетичних виробництв з використанням основних показників надійності: ймовірності безвідмовної роботи, інтенсивності відмов, середнього часу безвідмовної роботи, середнього часу відновлення та ймовірності перебування системи у працездатному та непрацездатному станах. Для досліджень, як приклад, була використана технологічна схема електрокоагуляційної установки для пом'якшення і очищення стічних вод, яка добре досліджена автором і представлена в роботі [1].

Метою дослідження є розробка математичних моделей для оцінки надійності систем водоочищення на теплоенергетичних виробництвах, а також аналіз взаємозв'язку між надійністю, ризиками та безпекою їхньої експлуатації, що дозволяє формалізувати процеси виникнення відмов, їхнього усунення та впливу на стабільність і ефективність роботи водоочисного обладнання.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОЯСНЕННЯ

1. Математичне вираження надійності для систем водоочищення.

Основні аспекти технічної надійності визначаються відповідно до державних і міжнародних стандартів і нормативно-технічних документів, зокрема ДСТУ 2860-94, ДСТУ 3004-95, ДСТУ EN 61078:2005, ISO 9001:2015, ISO 13849-1:2015, ІЕС 61508-1:2010, ГОСТ 27.002-89, ГОСТ 24.701-86 та інших [2,3].

Надійність технічної системи — це її здатність виконувати задані функції впродовж визначеного часу та в заданих умовах експлуатації. Для кількісної оцінки надійності технічних систем використовуються математичні моделі, що базуються на ймовірнісних підходах. Основними показниками, які характеризують надійність, є ймовірність безвідмовної роботи, ймовірність відмови, частота та інтенсивність відмов, а також середнє напруження до першої відмови. Нижче наведемо їх математичні вирази [2,3].

Надійність системи водоочищення можна виразити через ймовірність того, що система працюватиме без відмови протягом певного

часу t . Для кожного елемента i можна ввести функцію надійності $R_i(t)$, яка відображає ймовірність, що елемент працюватиме без відмови до часу t :

$$R_i(t) = P(T_i > t), \quad (1)$$

де T_i – час до відмови елемента i ; t – час, до якого визначається надійність.

Розподіл часу до відмови T_i може мати різні форми залежно від характеру зношування елемента. Один з найпоширеніших розподілів – експоненційний розподіл, який описує випадки, коли елементи системи не зношуються, і ймовірність їх відмови постійна з часом:

$$R_i(t) = e^{-\lambda_i t}, \quad (2)$$

де λ_i – інтенсивність відмови (частота відмов) елемента i .

У разі випадкових відмов без зношування елементів можна використовувати розподіл Вейбулла, який дозволяє моделювати різні типи зношування:

$$R_i(t) = e^{-(t/\lambda_i)^{\beta_i}}, \quad (3)$$

де λ_i – параметр масштабування (середній час до відмови), β_i – параметр форми, який визначає тип зношування: якщо $\beta_i > 1$, то система зношується з часом, якщо $\beta_i = 1$, це експоненційний розподіл (відмова з постійною інтенсивністю), а якщо $\beta_i < 1$, то елементи відмовляють раніше, ніж зазвичай.

Системи водоочищення можуть перебувати в різних станах, які змінюються у часі під впливом випадкових подій, зокрема відмов, відновлень, змін у робочих умовах та зовнішніх факторів. Математичне моделювання таких процесів дозволяє не лише аналізувати динаміку змін станів системи, але й прогнозувати її подальшу роботу, оцінювати ймовірність відмов, визначати оптимальні стратегії управління ризиками та підвищувати загальну ефективність експлуатації.

Для кількісної оцінки надійності систем водоочищення широко застосовуються ймовірнісні характеристики, які відображають закономірності виникнення відмов і відновлень [3].

Частота відмов – це одна з ключових ймовірнісних характеристик надійності систем

водоочищення, яка відображає, як часто відбуваються відмови за певний проміжок часу. Частота f відмов визначається як середня кількість відмов системи за одиницю часу:

$$f = \frac{N}{t}, \quad (4)$$

де N – кількість відмов за час, t – загальний час спостереження.

Інтенсивність відмов λ визначається як ймовірність відмови системи за малий проміжок часу dt , за умови, що система була справною до моменту часу t :

$$\lambda(t) = -\frac{dP_0(t)}{dt} \cdot \frac{1}{P_0(t)}, \quad (5)$$

де $\lambda(t)$ – інтенсивність відмов у момент часу t (вимірюється в 1/год, 1/хв тощо); $P_0(t)$ – ймовірність безвідмовної роботи до моменту часу t .

Інтенсивність відмов λ використовується для оцінки ймовірності відмови в конкретний момент часу. Частота відмов f визначає середню кількість відмов за певний період експлуатації. У системах, що працюють у стаціонарному режимі, f та λ приблизно рівні, але при змінній інтенсивності відмов необхідно враховувати залежність λ від часу t .

Якщо відмови розподілені за експоненційним законом, то інтенсивність відмов є сталою:

$$\lambda = \frac{1}{T}, \quad (6)$$

де T – середній час напрацювання до першої відмови.

Інтенсивність відмов $\lambda(t)$ показує, наскільки швидко зменшується ймовірність безвідмовної роботи системи в часі. Вона має такі властивості: якщо система працює стабільно без руйнування, інтенсивність відмов може бути сталою; якщо система зношується з часом, інтенсивність відмов зростає ($\lambda(t)$ збільшується); якщо після певного часу вихід із ладу стає менш ймовірним (наприклад, після початкового періоду нестабільності), інтенсивність відмов може зменшуватися.

Інтенсивність відмов також пов'язана з функцією щільності розподілу часу до

відмови $f(t)$ та ймовірністю безвідмовної роботи $P_0(t)$:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{P_0(t)}. \quad (7)$$

Вираження зв'язку інтенсивності відмов із функцією щільності розподілу відмов відображає фундаментальну залежність між ймовірністю безвідмовної роботи, розподілом часу до відмови та швидкістю зміни цих параметрів у часі.

Цей зв'язок показує, що інтенсивність відмов визначає відносну ймовірність виходу з ладу в момент часу t , за умови, що система до цього часу залишалася працездатною. Він дозволяє аналізувати характеристики надійності на основі емпіричних або теоретичних розподілів часу безвідмовної роботи та застосовувати математичні моделі для оцінки ефективності резервування та профілактичного обслуговування.

Таким чином, інтенсивність відмов $\lambda(t)$ відіграє ключову роль у дослідженні надійності систем водоочищення, дозволяючи визначати ймовірність відмови на різних етапах експлуатації.

Однак, для повного аналізу надійності важливо враховувати не лише моментні характеристики, а й узагальнені показники, які описують тривалість безвідмовної роботи системи в середньому. Одним із таких показників є середній час безвідмовної роботи, який визначається як математичне сподівання часу до першої відмови:

$$T = \int_0^{\infty} tf(t)dt. \quad (8)$$

Для експоненційного розподілу:

$$T = \frac{1}{\lambda}. \quad (9)$$

Ця характеристика дозволяє оцінити, як довго система або її елемент може працювати без збоїв, що є важливим для розрахунку планового технічного обслуговування, прогнозування ресурсів та оптимізації експлуатації.

Середній час безвідмовної роботи T є важливим узагальненим показником надійності, який дозволяє оцінити очікувану тривалість роботи системи без збоїв. Однак, для більш глибокого аналізу необхідно також враховувати ймовірність того, що система

залишиться працездатною до певного моменту часу.

Ця ймовірність описується функцією ймовірності безвідмовної роботи $P_0(t)$, яка визначає, з якою ймовірністю система не знає відмови протягом часу t . Вона визначається як розв'язок диференціального рівняння:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda(t)P_0(t). \quad (10)$$

Розв'язуючи це рівняння, отримуємо загальну формулу:

$$P_0(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}. \quad (11)$$

Якщо інтенсивність відмов є сталою ($\lambda(t) = \lambda = \text{const}$), ця формула спрощується до експоненційного закону надійності:

$$P_0(t) = e^{-\lambda t}. \quad (12)$$

Цей вираз показує, що ймовірність безвідмовної роботи експоненційно зменшується з часом, а швидкість цього зменшення визначається інтенсивністю відмов. Такий підхід доцільно застосовувати для оцінки надійності систем водоочищення, де критично важливо забезпечити безперервне очищення води.

Надійність систем водоочищення безпосередньо залежить не лише від їхньої безвідмовної роботи, а й від здатності швидко відновлювати функціонування після виникнення несправностей. Навіть короточасні простої можуть призвести до зниження якості очищеної води, порушення санітарних норм та значних економічних втрат.

Саме тому відновлення систем водоочищення є важливим процесом, що забезпечує безперервність очищення та постачання води. Аналіз ймовірності відновлення дозволяє оцінити швидкість і ефективність ремонтних заходів, визначити оптимальні стратегії технічного обслуговування та мінімізувати ризики тривалих простоїв.

Якщо система може бути відновлена після відмови з інтенсивністю ремонту μ , то ймовірності перебування в працездатному та непрацездатному станах у стаціонарному

режимі можна визначити наступними виразами:

$$P_0^\infty = \frac{\mu}{\lambda + \mu}; P_1^\infty = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}, \quad (13)$$

де P_0^∞ – ймовірність того, що система знаходиться у працездатному стані в довготривалому режимі (при $t \rightarrow \infty$); P_1^∞ – ймовірність того, що система знаходиться у стані відмови в довготривалому режимі; λ – інтенсивність відмов, тобто частота переходу системи з працездатного стану в стан відмови; μ – інтенсивність ремонту, тобто частота відновлення системи до працездатного стану.

У нестационарному випадку:

$$\begin{aligned} \frac{dP_0(t)}{dt} &= -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t); \\ \frac{dP_1(t)}{dt} &= \lambda P_0(t) - \mu P_1(t). \end{aligned} \quad (14)$$

Розв'язок цієї системи дає:

$$\begin{aligned} P_0(t) &= \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}; \\ P_1(t) &= \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}. \end{aligned} \quad (15)$$

Ймовірність відновлення технічної системи залежить від інтенсивності відмов λ та інтенсивності ремонту μ . У стаціонарному режимі система з певною ймовірністю може перебувати у працездатному (P_0^∞) або непрацездатному (P_1^∞) стані, що визначається співвідношенням λ і μ . У динамічному режимі перехідний процес описується експоненціальними функціями, які з часом наближаються до стаціонарних значень.

Таким чином, з плином часу ймовірність знаходження системи у працездатному або непрацездатному стані наближається до стаціонарних значень, що дозволяє оцінити ефективність процесу відновлення та оптимізувати параметри технічного обслуговування.

2. Математичне вираження ризику для систем водоочищення.

Зв'язок між ймовірністю ризику та надійністю є фундаментальним аспектом у забезпеченні безпеки технічних систем. Цей взаємозв'язок визначає, наскільки ефективно система водоочищення може протистояти

потенційним загрозам та забезпечувати безперебійне функціонування, зокрема в умовах підвищеного навантаження, аварійних ситуацій або змін у якості вихідної води. Висока надійність і швидкість реагування на відмови дозволяють мінімізувати ризики забруднення, уникнути тривалих простоїв та забезпечити стабільне постачання очищеної води споживачам.

Надійність системи визначається її здатністю виконувати необхідні функції без відмов протягом визначеного періоду часу. Вона є фундаментальним поняттям, що відображає якість проектування, виготовлення, експлуатації та обслуговування системи водоочищення. Висока надійність зменшує ймовірність виникнення аварійних ситуацій, які можуть призвести до негативних наслідків, таких як людські втрати, матеріальні збитки, екологічні катастрофи та соціальні потрясіння. Надійність залежить від якості компонентів, проектування, технічного обслуговування та інших факторів, що впливають на функціонування системи.

Ймовірність ризику, з іншого боку, відображає можливість виникнення небажаних подій, які можуть завдати шкоди.

Основна нормативна база теорії ризиків складається з директив Європейського Союзу 89/391/ЕЕС, та підпорядковані їй спеціальні директиви з безпеки праці на робочих місцях (89/654/ЕЕС, 89/655/ЕЕС, 89/656/ЕЕС, 90/269/ЕЕС, 90/270/ЕЕС тощо) і директиви про захист працівників від хімічних, фізичних і біологічних ризиків (98/24/ЕС, 2000/54/ЕС, 2002/44/ЕС тощо), а положення аналізу і оцінки ризиків і управління ними включені в міжнародні стандарти ISO 14001, ISO 9001 і OHSAS 18001 [4-6]. В Україні зараз немає нормативного державного визначення поняття «техногенний ризик», тому в науковій літературі є розбіжності при визначенні цього поняття і часто ризик оцінюється як добуток ймовірності події на її наслідки [4]. Висока ймовірність ризику означає, що система є вразливою до потенційних загроз, які можуть виникнути через відмови обладнання, помилки персоналу, зовнішні впливи або інші фактори. Розуміння ймовірності ризику дозволяє

оцінити потенційні небезпеки та розробити заходи для їх мінімізації.

Якщо ризик $R(t)$ визначити як добуток ймовірності відмови на величину збитків C , то його можна виразити наступною формулою:

$$R(t) = P_1(t) \times C. \quad (16)$$

Підставляючи значення $P_1(t)$, отримаємо:

$$R(t) = C \left(\frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \right). \quad (17)$$

Модель ризику системи водоочищення дозволяє кількісно оцінити ймовірність виникнення несприятливих подій та їхні наслідки для функціонування системи. Формули, використані в моделі, демонструють взаємозв'язок між ймовірністю відмов, інтенсивністю їх виникнення, швидкістю відновлення та рівнем потенційних збитків.

Таким чином, модель ризику є важливим інструментом для аналізу надійності систем водоочищення, дозволяючи оптимізувати їх роботу, мінімізувати аварійні ситуації та розробляти ефективні стратегії управління ризиками. Її застосування у водоочищенні сприяє підвищенню безпеки, надійності та стабільності постачання очищеної води.

Взаємозв'язок між надійністю та ймовірністю ризику є очевидним: низька надійність системи збільшує ймовірність виникнення аварійних ситуацій, що, у свою чергу, підвищує ймовірність ризику. І навпаки, висока надійність системи зменшує ймовірність виникнення аварійних ситуацій, що знижує ймовірність ризику.

Отже, забезпечення високої надійності систем водоочищення є критично важливим завданням, що потребує постійного моніторингу стану обладнання, впровадження сучасних методів технічного обслуговування та застосування ефективних методів управління ризиками.

3. Математичне вираження безпеки систем водоочищення

Для забезпечення безпеки систем водоочищення необхідно враховувати фактори, що впливають на взаємозв'язок між надійністю та ймовірністю ризику. До них

належать технічні характеристики системи водоочищення, умови експлуатації, технічне обслуговування та людський фактор. Важливо використовувати аналіз надійності та ризику для оцінки потенційних небезпек та розробки заходів для їх мінімізації [7,8].

Безпека систем водоочищення є комплексним показником, який визначає здатність системи ефективно функціонувати без збоїв, запобігати аваріям і гарантувати відповідність очищеної води санітарним нормам. Вона залежить від надійності обладнання, ефективності відновлення після відмов, а також своєчасного виявлення та усунення потенційних загроз.

Для кількісної оцінки безпеки використовуються математичні моделі, які враховують ймовірність відмов, інтенсивність їх виникнення та швидкість відновлення. Це дозволяє формально виразити рівень безпеки через математичні залежності, що допомагає оптимізувати роботу водоочисних споруд, мінімізувати ризики та забезпечити стабільну подачу чистої води.

Якщо рівень безпеки $S(t)$ можна визначити через функцію втрат L отримаємо наступне вираження:

$$S(t) = P_0(t)(1 - L) + P_1(t)L, \quad (18)$$

де $P_0(t)$ – ймовірність того, що система працездатна в момент часу t ; $P_1(t)$ – ймовірність того, що система відмовила в момент часу t ; L – втрати або ризик, що пов'язані зі станом відмови.

Це рівняння відображає рівень безпеки системи як зважену суму ймовірностей її знаходження у працездатному та непрацездатному станах. Її можна обґрунтувати наступним чином, якщо система працездатна $P_0(t)$, рівень безпеки знижується на величину втрат, помножену на $(1 - L)$, оскільки ризик є мінімальним. Якщо система відмовила $P_1(t)$, рівень безпеки визначається із урахуванням втрат L . Це вираження враховує як ймовірність відмови, так і потенційні наслідки, що дозволяє кількісно оцінити рівень безпеки системи у будь-який момент часу.

Підставляючи знайдені значення, отримаємо:

$$S(t) = \left(\frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \right) (1 - L) \left(\frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \right). \quad (19)$$

Це вираження визначає рівень безпеки системи $S(t)$ через ймовірності її перебування у працездатному ($P_0(t)$) та непрацездатному ($P_1(t)$) станах, а також через функцію втрат L .

Вираз рівня безпеки враховує ймовірність перебування системи у працездатному та непрацездатному станах, а також вплив втрат у разі відмови.

З отриманого виразу видно, що рівень безпеки залежить від параметрів надійності системи – інтенсивності відмов λ та інтенсивності відновлення μ . З часом $S(t)$ стабілізується, прямує до стаціонарного значення, визначеного як:

$$S(\infty) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} (1 - L) + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} L. \quad (20)$$

Це означає, що за достатньо великих значень t рівень безпеки системи визначається лише співвідношенням λ і μ та коефіцієнтом втрат L .

Якщо втрати від відмови великі ($L \rightarrow 1$), рівень безпеки знижується. Якщо система має високу ймовірність відновлення ($\mu \gg \lambda$), рівень безпеки буде наближатися до 1.

Таким чином, для підвищення безпеки системи необхідно зменшувати інтенсивність відмов λ та підвищувати ефективність відновлення, що дозволяє компенсувати можливі ризики.

Представлені моделі можуть бути використані для аналізу надійності в різних системах водоочищення, включаючи технологічні процеси підготовки води для теплоенергетичних підприємств, промислових об'єктів і міських очисних споруд, а також для оцінки ефективності роботи очисних комплексів у системах централізованого водопостачання. Вони дозволяють прогнозувати ймовірність відмов, визначати оптимальні режими експлуатації, оцінювати вплив параметрів надійності на стабільність роботи системи та розробляти стратегії технічного обслуговування для мінімізації ризиків і підвищення загальної ефективності очищення води.

Представлені математичні моделі є спрощеними і реальні системи водоочищення є набагато складнішими. Функція $f(\lambda)$ може бути різною залежно від конкретної системи та типу техногенного ризику. Оцінка наслідків S також може бути складною та вимагати врахування багатьох факторів. Для більш точних розрахунків необхідно додатково використовувати логіко-графічні методи аналізу ризиків, таких як *FTA* та *ETA* [4,9]. Отже, хоча пряме об'єднання формул ризику та надійності може бути складним, ми можемо показати їх взаємозв'язок, виразивши ймовірність ризику через параметри надійності, такі як інтенсивність відмов, середній час безвідмовної роботи, середній час відновлення та загальний час експлуатації системи. Враховуючи ці параметри, можна оцінити ймовірність перебування системи у працездатному чи непрацездатному стані, визначити критичні точки в її функціонуванні та оптимізувати стратегії управління техногенними ризиками.

Крім того, безпека системи водоочищення безпосередньо залежить від її надійності та рівня техногенного ризику. Зменшення інтенсивності відмов та скорочення часу відновлення сприяють підвищенню рівня безпеки експлуатації, що особливо важливо для теплоенергетичних підприємств. Оптимізація цих параметрів дозволяє мінімізувати ймовірність аварійних ситуацій, забезпечити стабільну роботу обладнання та знизити потенційні екологічні та економічні втрати.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Запропонована математична модель безпеки систем водоочищення дозволяє формально описати зв'язок між надійністю, ризиком та безпекою систем водоочищення.
2. Вираз рівня безпеки враховує ймовірність перебування у працездатному та непрацездатному станах разом із наслідками відмови.
3. При аналізі складних систем водоочищення доцільно застосовувати додаткові показники, такі як коефіцієнт готовності.
4. Запропоновані математичні вирази можуть бути використані для загального

прогнозування ефективності процесів обслуговування та оптимізації відновлення систем водоочищення.

5. У зв'язку з тим, що в теплоенергетиці існує велика кількість методів і обладнання для очищення води, математичне моделювання безпеки в кожному конкретному випадку буде розраховуватись з урахуванням специфіки застосованих технологій, параметрів експлуатації та вимог до якості води.

6. Подальші дослідження можуть включати розгляд більш складних моделей, зокрема, стохастичних процесів з різномірними розподілами.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Uriadnikova I. V., Lebedev V. H., Zaplatynskyi V. M., Tsyhanenko O. I.** Early determination and evaluation of technogenic risks within the water purification systems of TSS and TPSS // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2022, № 1. 95 – 101. ISSN 2071-2227, E-ISSN 2223-2362. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-1>.
2. **ДСТУ 2860-94.** Надійність техніки. Терміни та визначення: Київ: Держстандарт України, 1994. 92 с.
3. **ДСТУ 2862-94.** Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги. Київ: Держстандарт України, 1995. 38 с.
4. **Хенли Э. Дж., Кумамото Х.** Надежность технических систем и оценка риска. пер. с англ. Москва: Машиностроение, 1984. 528 с. URL: http://www.immsp.kiev.ua/postgraduate/Biblioteka_trudy/NadezhnostTekhnicheskikhSistemKumamoto1984.pdf
5. **Лисиченко Г. В., Забулонов Ю. Л., Хміль Г.А.** Природний, техногенний та екологічний ризику: аналіз, оцінка, управління. Київ: Наукова думка, 2008. 543 с. URL: <https://www.nas.gov.ua/UA/Book/Pages/default.aspx?BookID=0000012597>
6. **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. URL: <https://surl.li/xogmav>.
7. **Nowakowski T., Młyńczak M., Jodejko-Pietruczuk A., Werbińska-Wojciechowska S.** Safety and Reliability: Methodology and Applications. Abingdon: CRC Press, Taylor & Francis, 2014. 408 p. URL: <https://surl.li/bozeip>.
8. **Panchal D., Ram M., Chatterjee P., Kumar Sachdeva A.** Industrial Reliability and Safety Engineering Applications and Practices. Abingdon: CRC Press, Taylor & Francis, 2023. 136 p. URL: <https://surl.li/wjenvv>.
9. **Shahani N. M., Sajid M. J., Zheng X., Jiskani I. M., Brohi M. A., Ali M., Qureshi A. R.** Fault tree analysis and prevention strategies for gas explosion in underground coal mines of Pakistan // *Mining of Mineral Deposits*, 13(4), 2019, 121-128. <https://doi.org/10.33271/mining13.04.121>.

REFERENCES

1. **Uriadnikova, I. V., Lebedev, V. H., Zaplatynskyi, V. M., & Tsyhanenko, O. I. (2022).** Early determination and evaluation of technogenic risks within the water purification systems of TSS and TPSS. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 1. 95-101. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-1>. [in Ukrainian].
2. **DSTU 2860-94. (1994).** *Reliability of equipment. Terms and definitions*. Kyiv: State Standard of Ukraine. Retrieved from https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=25034 [in Ukrainian].
3. **DSTU 2862-94. (1995).** *Reliability of equipment. Methods for calculating reliability indicators. General requirements*. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy. Retrieved from https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=53946 [in Ukrainian].
4. **Henly, E. J., & Kumamoto, H. (1984).** *Reliability of technical systems and risk assessment*. Trans. with English. Moscow: Mashinostroenie. Retrieved from http://www.immsp.kiev.ua/postgraduate/Biblioteka_trudy/NadezhnostTekhnicheskikhSistemKumamoto1984.pdf [in Russian].
5. **Lysychenko, G. V., Zabulonov, Yu. L., & Khmil, G. A. (2008).** *Natural, man-made and environmental risks: analysis, assessment, management*. Kyiv: Naukova dumka. Retrieved from <https://www.nas.gov.ua/UA/Book/Pages/default.aspx?BookID=0000012597> [in Ukrainian].
6. **Uriadnikova, I. V. (2020).** Analiz i vyznachennia tekhnohennykh ryzykiv pry shtatnii roboti u protsesi vodochyshchennia metodom reagentnoi koahuliatsii i elektrokoahuliatsii. *Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho*, 5-6, 124-125. Retrieved from <https://surl.li/xogmav>. [in Ukrainian].
7. **Nowakowski, T., Młyńczak, M., Jodejko-Pietruczuk, A., & Werbińska-Wojciechowska, S.**

(2014). *Safety and Reliability: Methodology and Applications*. Abingdon: CRC Press, Taylor & Francis. Retrieved from <https://surl.li/bozeip>.

8. Panchal, D., Ram, M., Chatterjee, P., & Kumar Sachdeva, A. (2023). *Industrial Reliability and Safety Engineering Applications and Practices*. Abingdon: CRC Press, Taylor & Francis. Retrieved from <https://surl.li/wjenvv>.

9. Shahani, N. M., Sajid, M. J., Zheng, X., Jiskani, I. M., Brohi, M. A., Ali, M., ..., & Qureshi, A. R. (2019). Fault tree analysis and prevention strategies for gas explosion in underground coal mines of Pakistan. *Mining of Mineral Deposits*, 13(4), 121-128. <https://doi.org/10.33271/mining13.04.121>.

Research on the interrelationship between reliability, risks and safety of water treatment systems

Inga Uriadnikova

Abstract. Today, water treatment systems in thermal power plants are an integral part of the technological process, since the quality of the prepared water directly affects the efficiency of boiler and heat exchange equipment. Water used in thermal power must meet strict regulatory requirements, since even minor deviations can lead to corrosion of metal surfaces, scale formation and a decrease in heat exchange efficiency. In order to study the analysis of the relationship between the reliability, risks and safety of operation of water treatment equipment in thermal power plants, it is proposed to develop mathematical models for assessing the reliability of water treatment systems in thermal power plants, which will allow formalizing the processes of failure occurrence, their elimination and impact on the stability and efficiency of water treatment equipment. Analysis of the results obtained showed that the use of mathematical models allows not only to quantitatively assess the reliability of water treatment systems in thermal power plants, but also to identify patterns that determine their durability, stability of operation and level of safety. The calculations confirmed that there is a close relationship between the probability of failure-free operation, failure intensity, mean time without failure and the efficiency of the system as a whole. The results obtained indicate that a significant reduction in the risks of emergency situations can be achieved by increasing the speed of equipment recovery, which directly affects the reduction of downtime, which, in turn, contributes to increasing the overall efficiency of the system, reducing water and energy losses, as well as minimizing the negative impact on the production process. The study also confirmed that the relationship between reliability, risks and safety of the system has a significant impact on its operational characteristics. In particular, systems with a higher level of reliability demonstrate a lower probability of failures, which has a positive effect on the overall efficiency of thermal power enterprises. The proposed mathematical expressions allow predicting the operability of equipment over a certain period of time, assessing the impact of variable parameters on the stability of the system and making informed decisions on its improvement. The analysis confirmed the effectiveness of using mathematical methods to assess the reliability and safety of water treatment systems.

Keywords: safety, reliability, technogenic risks, water treatment systems, heat and power engineering.

Стаття надійшла до редакції 07.03.2025