

ВИЗНАЧЕННЯ КРИТЕРІЇВ ОЦІНКИ СТІЙКОСТІ І ВРАЗЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ ВОДООЧИЩЕННЯ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ

Інга Уряднікова

Київський національний університет будівництва і архітектури
31, проспект Повітряних Сил, Київ, 03037, Україна
канд. техн. наук, uryadnikova.iv@knuba.edu.ua, orcid.org/0000-0002-3750-876X

DOI: 10.32347/2524-0021.2025.51.53-59

Анотація. Актуальними питаннями сьогодення у сфері водопостачання, особливо для об'єктів критичної інфраструктури, якою є системи водоочищення, є не лише підвищення ефективності виробничих процесів та зниження енергетичних витрат, а й забезпечення їхньої стійкості та вразливості в умовах множинних зовнішніх загроз. Аналіз причин промислових аварій та пошкоджень, а також наслідків природних катаклізмів і воєнних дій, показує, що порушення функціонування систем водоочищення характеризується поєднанням випадкових подій, що виникають з різною частотою та інтенсивністю на різних стадіях їхньої роботи. З метою визначення та обґрунтування критеріїв для кількісної оцінки стійкості та вразливості функціонування систем водоочищення в умовах дії загроз техногенного, природного та воєнного характеру для ефективного управління ризиками в системах водоочищення, було проведено дослідження, що включало розділення поняття надійності на внутрішню надійність, стійкість та вразливість. Аналіз отриманих результатів показав, що: 1) розширено концепцію оцінки надійності. Дослідження довело необхідність і можливість інтеграції понять стійкості та вразливості в традиційну оцінку надійності систем водоочищення, що забезпечує більш повне уявлення про комплексну надійність функціонування в умовах різнопланових зовнішніх загроз (техногенних, природних, воєнних). 2) Розроблено систему кількісних критеріїв стійкості та сформовано підхід та виведено математичні залежності для об'єктивної кількісної оцінки загальної стійкості. Цей показник об'єднує часткові коефіцієнти, що характеризують специфічну резистентність до кожного типу загрози, а також коефіцієнт відновлювальних можливостей, який відображає здатність системи до швидкого відновлення. 3) Визначено критерії кількісної оцінки вразливості й обґрунтовано та представлено математичні залежності для розрахунку вразливості системи, що дозволяє не лише загально оцінити схильність системи до негативних наслідків, а й ідентифікувати конкретні «слабкі ланки» через аналіз часткових критеріїв вразливості. 4) Обґрунтовано практичну цінність підходу для ефективного управління ризиками. Запропоновані критерії надають об'єктивний інструментарій для ефективного управління ризиками в системах водоочищення і дозволяють обґрунтовано зосереджувати увагу на захисних заходах та інвестиціях, спрямовуючи ресурси на найбільш вразливі ланки системи, що потребують першочергового зміцнення. 5) Створена основа для ефективного управління безпекою передбачає можливість кількісної оцінки стійкості та вразливості, що забезпечує розробку і впровадження стратегій підвищення безпеки з метою сталого та безперебійного водопостачання в умовах зростаючої невизначеності й потенційних загроз.

Ключові слова: стійкість, вразливість, надійність, безпека, техногенні ризики, системи водоочищення.

ВСТУП

Сучасні системи водоочищення – невід'ємна складова критичної інфраструктури, що відіграє центральну роль у підтримці життє-

діяльності та забезпеченні суспільної стабільності. Їхня здатність безперебійно постачати воду необхідної якості є вирішальним фактором для громадського здоров'я, економічної стійкості та національної безпеки.

Водночас, стабільність роботи цих систем постійно перебуває під впливом зовнішніх загроз, таких як техногенні аварії, природні катаклізми та загрози воєнного характеру. Традиційні підходи до оцінки надійності систем водопостачання та водоочищення історично зосереджувалися переважно на внутрішніх технічних параметрах – безвідмовності обладнання, ресурсі експлуатації та ефективності технологічних процесів [1,2]. Однак, досвід останніх років, особливо в умовах повномасштабних воєнних дій, переконливо продемонстрував критичну вразливість систем водоочищення до множинних загроз, що можуть призвести не лише до порушення їхньої функціональності, а й до масштабних гуманітарних та екологічних катастроф. У цих умовах актуалізується нагальна потреба у розширенні та поглибленні методології оцінки надійності систем водоочищення. Вона має включати інтегроване розуміння стійкості як здатності системи протистояти зовнішнім впливам і своєчасно відновлюватися після них, а також вразливості як міри схильності системи до негативних наслідків таких впливів [3]. Для ефективного управління ризиками та розробки заходів щодо запобігання їх виникненню необхідно не лише якісно визначити ці поняття, а й сформулювати чіткі, обґрунтовані та підтверджені критерії їхньої кількісної оцінки.

Розробка таких критеріїв дозволить перейти від описового аналізу до об'єктивного вимірювання рівня захищеності та стійкості цих критично важливих об'єктів, забезпечуючи основу для прийняття обґрунтованих управлінських рішень щодо підвищення їхньої надійності та безпеки.

Метою дослідження є визначення та обґрунтування критеріїв для кількісної оцінки стійкості та вразливості функціонування систем водоочищення в умовах дії загроз техногенного, природного та воєнного характеру для ефективного управління ризиками в системах водоочищення.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОЯСНЕННЯ

1. Критерії оцінки стійкості та вразливості

Безперебійне постачання якісної води є важливим для суспільства, що робить системи водоочищення ключовими об'єктами інфраструктури. Традиційна оцінка надійності, сфокусована на внутрішніх технічних параметрах, виявилася недостатньою перед впливом зростаючих зовнішніх загроз: техногенних аварій, природних катастроф та воєнних конфліктів. Сучасні виклики вимагають розширеного підходу, що інтегрує поняття стійкості – здатності системи протистояти впливам та швидко відновлюватися – та вразливості – міри її схильності до негативних наслідків.

Оцінка стійкості та вразливості систем водоочищення до зовнішніх загроз є ключовим етапом у системному управлінні ризиками [3,4]. Ці критерії дозволяють не лише ідентифікувати потенційні слабкі місця, а й кількісно виміряти здатність системи протистояти руйнівним впливам та ефективно відновлюватися після них.

У цьому дослідженні розглядається технологічна схема електрокоагуляційної установки для пом'якшення та очищення стічних вод. Ця схема є результатом попередніх досліджень і детально викладена в роботі [5].

1.1. Критерії оцінки стійкості ($S_{\text{заг}}$)

Стійкість є багатокомпонентним показником, що відображає комплексну здатність системи водоочищення зберігати свою функціональність, підтримувати задані параметри якості та безперебійності водопостачання, або оперативно відновлювати повну працездатність після впливу деструктивних зовнішніх факторів. Це не статична характеристика, а динамічна властивість, яка поєднує в собі дві ключові складові: резистентність та відновлюваність. Резистентність визначає притаманну здатність системи протистояти пошкодженням та зберігати критично важливі функції, незважаючи на зовнішні збурення, мінімізуючи безпосередні наслідки впливу. Це проявляється у міцності конструкцій, наявності захисних споруд, фізичному та кібернетичному захисті, а також у надлишковості, резервуванні ключових

елементів та джерел ресурсів. Водночас, відновлюваність відображає ефективність та швидкість, з якою система може повернутися до нормального або прийнятного рівня функціонування після інциденту, що спричинив збій. Цей аспект охоплює наявність чітких планів реагування на надзвичайні ситуації, доступність кваліфікованого персоналу та ремонтних бригад, достатність аварійних запасів реагентів та запчастин, а також ефективність логістичних ланцюгів для їх оперативного постачання. Таким чином, стійкість є інтегральним показником, що враховує як превентивні (захисні) заходи, так і реактивні (відновлювальні) можливості, формуючи повне уявлення про адаптивність системи до умов підвищеної зовнішньої невизначеності та загроз.

Загальний вираз стійкості можемо представити наступним чином:

$$S_{\text{зовн}} = \left(\prod_{j=1}^{N_G} G_{G_j} \right) \cdot K_{\text{відн}}, \quad (1)$$

де $S_{\text{зовн}}$ – загальний інтегральний критерій стійкості системи до всіх зовнішніх загроз (безрозмірний показник, $0 \leq S_{\text{зовн}} \leq 1$); G_{G_j} – частковий критерій стійкості до конкретного типу зовнішньої загрози G_j (наприклад, техногенної, природної, воєнної); N_G – загальна кількість розглянутих типів зовнішніх загроз; $K_{\text{відн}}$ – критерій, що відображає загальні відновлювальні можливості системи.

Кожен тип зовнішніх загроз – техногенних, природних, або воєнних – має свою специфіку впливу на системи водоочищення та вимагає унікальних підходів до оцінки стійкості. Частковий критерій стійкості до конкретного типу загрози G_j , позначається як S_{G_j} , і являє собою ймовірність того, що система успішно протистоїть даній загрозі, зберігаючи свою функціональність або мінімізуючи наслідки її впливу до прийнятного рівня. Оцінка кожного S_{G_j} базується на комплексі коефіцієнтів, що відображають різні аспекти захисту та готовності системи.

Загальна стійкість ($S_{\text{заг}}$) є інтегральним показником, що відображає комплексну здатність системи водоочищення успішно протистояти одночасному або послідовному

впливу різнотипних зовнішніх загроз та/або ефективно відновлювати свою функціональність після таких впливів. Це кінцевий агрегований критерій, який узагальнює оцінки стійкості до конкретних видів загроз та враховує відновлювальні можливості системи.

Загальний вираз стійкості можемо представити в наступному вигляді:

$$S_{\text{заг}} = (S_{\text{техноген}} \cdot S_{\text{природ}} \cdot S_{\text{воєн}}) \cdot K_{\text{відн}}, \quad (2)$$

де $S_{\text{заг}}$ – загальна стійкість системи до зовнішніх загроз. Це безрозмірний показник, значення якого лежить у діапазоні від 0 до 1, де 1 означає абсолютну стійкість; $S_{\text{техноген}}$ – частковий критерій стійкості до техногенних загроз; $S_{\text{природ}}$ – частковий критерій стійкості до природних загроз; $S_{\text{воєн}}$ – частковий критерій стійкості до загроз воєнного характеру; $K_{\text{відн}}$ – коефіцієнт, що враховує загальні відновлювальні можливості системи.

Добуток часткових критеріїв стійкості ($S_{\text{техн}} \cdot S_{\text{природн}} \cdot S_{\text{воєн}}$) означає, що ця частина виразу відображає резистентність системи до одночасної дії або послідовних впливів різних типів загроз. Використання добутку означає, що якщо система є абсолютно нестійкою (тобто S_{G_j}) до хоча б одного типу загрози, то і її загальна стійкість до зовнішніх впливів, без врахування відновлення, буде дорівнювати нулю. Це підкреслює принцип «найслабшої ланки»: система настільки стійка, наскільки стійка її найуразливіша ланка до певного типу загрози. Цей компонент оцінює здатність системи запобігати збоям або мінімізувати їхній масштаб за рахунок превентивних заходів та внутрішньої міцності.

Коефіцієнт відновлювальних можливостей ($K_{\text{відн}}$) має наступний вигляд:

$$K_{\text{відн}} = e^{-k \cdot \tau_{\text{від}}}. \quad (3)$$

Цей коефіцієнт інтегрує аспект відновлюваності в загальну оцінку стійкості. Він відображає здатність системи швидко та ефективно повертатися до працездатного стану після виникнення збою, спричиненого зовнішнім впливом. Навіть якщо система зазнала пошкодження, високий $K_{\text{відн}}$ може суттєво підвищити її загальну стійкість,

оскільки тривалий простій є одним із ключових факторів ризику. Чим менший середній час відновлення ($\tau_{\text{відн}}$), тим вище значення $K_{\text{відн}}$, що свідчить про кращу резистентність системи в цілому. Константа k дозволяє врахувати критичність простою для даної системи.

Високе значення $S_{\text{заг}}$ (близьке до 1) свідчить про те, що система водоочищення має високу здатність протистояти широкому спектру зовнішніх загроз, ефективно запобігаючи збоєм, або швидко відновлюючи функціональність у разі їх виникнення. Це означає, що ризик втрати безперебійного постачання якісної води через зовнішні фактори є низьким. Низьке значення $S_{\text{заг}}$ (близьке до 0) вказує на значну вразливість системи та високу ймовірність порушень її функціонування під дією зовнішніх загроз, що вимагає негайних заходів з підвищення безпеки та надійності. Оцінка $S_{\text{заг}}$ дозволяє системно підходити до визначення пріоритетів у плануванні захисних заходів та економічних інвестицій, спрямованих на зміцнення системи водоочищення перед комплексними викликами.

1.2. Критерії оцінки вразливості ($V_{\text{заг}}$)

Вразливість ($V_{\text{заг}}$) є багатокомпонентним показником, що відображає міру схильності системи водоочищення до негативних наслідків під впливом зовнішніх деструктивних загроз. На відміну від стійкості, яка акцентує увагу на здатності протистояти, вразливість фокусується на ідентифікації «слабких ланок» та потенційних точок відмови, які можуть бути використані загрозами. По суті, вразливість є оберненою до стійкості характеристикою, і її підвищення свідчить про зниження загальної надійності системи.

Враховуючи, що стійкість та вразливість є взаємодоповнюючими показниками (як ймовірність сприятливого результату та ймовірність відмови/збою), загальну вразливість системи можна виразити як:

$$V_{\text{заг}} = 1 - S_{\text{заг}}, \quad (3)$$

де $V_{\text{заг}}$ – загальна вразливість системи до зовнішніх загроз. Це безрозмірний показник, значення якого лежить у діапазоні від 0 до 1,

де 1 означає абсолютну вразливість, а 0 – повну невразливість; $S_{\text{заг}}$ – загальна стійкість системи до зовнішніх загроз, розрахована за формулою (2).

Часткові критерії вразливості ($V_{\text{заг}}$) є специфічними показниками, що відображають міру схильності системи водоочищення до негативних наслідків від конкретного типу зовнішніх загроз. Вони є прямим доповненням до відповідних часткових критеріїв стійкості (S_{G_j}), і розраховуються за виразом:

$$V_{G_j} = 1 - S_{G_j}. \quad (4)$$

Вразливість до техногенних загроз ($V_{\text{техноген}}$) показує схильність системи до збоїв через недостатню енергетичну безпеку, вразливість до кібератак або нездатність адаптуватися до хімічних забруднень, а вразливість до природних загроз ($V_{\text{природн}}$) характеризує її сприйнятливості до пошкоджень від повеней, землетрусів чи нездатності працювати в екстремальних кліматичних умовах. Окрім того, вразливість до загроз воєнного характеру ($V_{\text{воєн}}$) відображає схильність системи до виведення з ладу внаслідок фізичних впливів, диверсій, недостатнього резервування чи автономності. Кожен із цих часткових критеріїв, що розраховується як $V_{G_j} = 1 - S_{G_j}$, дозволяє точно ідентифікувати слабкі місця системи водоочищення для цілеспрямованого управління ризиками.

Таким чином, узагальнений вираз для оцінки загальної вразливості ($V_{\text{заг}}$) системи має наступний вигляд:

$$V_{\text{заг}} = 1 - ((S_{\text{техн}} \cdot S_{\text{природн}} \cdot S_{\text{воєн}}) \cdot K_{\text{відн}}). \quad (5)$$

Формула (5) є центральним елементом для кількісної оцінки загальної вразливості системи водоочищення до різноманітних зовнішніх загроз і відображає міру схильності системи до втрати функціональності або неспроможності ефективно відновитися після впливу деструктивних чинників. Цей розрахунок базується на принципі, що загальна вразливість є доповненням до загальної стійкості. Спочатку обчислюється загальна стійкість, яка є добутком трьох часткових критеріїв стійкості до різних типів загроз

(що відображає комплексний опір системи) та коефіцієнта відновлювальних можливостей (що враховує швидкість та ефективність її відновлення). Потім, від одиниці віднімається значення цієї загальної стійкості, щоб отримати загальну вразливість.

Цей показник є потужним аналітичним інструментом, адже надає комплексну та кількісну оцінку загальної вразливості системи водоочищення. Він агрегує вплив загроз, показуючи, що вразливість залежить як від здатності протистояти впливам (резистентності), так і від ефективності відновлення ($K_{\text{відн}}$). Оцінка резистентності через добуток часткових критеріїв стійкості базується на принципі послідовного з'єднання критичних загроз, згідно з яким загальна стійкість системи визначається найслабшою ланкою. Високе значення $V_{\text{заг}}$ свідчить про значні ризики та необхідність негайних заходів для підвищення стійкості, тоді як низьке значення підтверджує ефективність захисних механізмів та планів реагування, вказуючи на високий рівень функціональної безпеки системи водоочищення.

2. Взаємозв'язок стійкості та вразливості в управлінні ризиками

Ефективне управління ризиками функціонування систем водоочищення як об'єктів критичної інфраструктури неможливе без глибокого розуміння взаємозв'язку між стійкістю ($S_{\text{заг}}$) та вразливістю ($V_{\text{заг}}$). Ці два показники є взаємодоповнюючими сторонами одного явища – загальної резистентності системи до зовнішніх загроз. Вони дозволяють кількісно оцінити здатність об'єкта протистояти впливам та його потенційну схильність до негативних наслідків, тим самим забезпечуючи комплексну картину ризиків. У сучасному світі, де об'єкти водопостачання стикаються з широким спектром викликів – від техногенних аварій і природних катаклізмів до гібридних і воєнних загроз – традиційна оцінка надійності виявляється недостатньою. Саме взаємодія між стійкістю та вразливістю формує основу для ефективного підходу до безпеки.

Кількісна оцінка ризиків функціонування системи водоочищення під впливом зовніш-

ніх загроз прямо впливає з показників стійкості та вразливості. Ризик (R) часто визначається як добуток ймовірності події (в даному випадку – прояву вразливості) на величину її наслідків [6,7].

Якщо $V_{\text{заг}}$ відображає ймовірність того, що система буде вразливою до впливу, тоді загальний ризик (R) системи водоочищення можна представити як:

$$R = V_{\text{заг}} \cdot C, \quad (6)$$

де R – ризик втрати функціональності системи водоочищення внаслідок зовнішніх загроз; $V_{\text{заг}}$ – загальна вразливість системи до зовнішніх загроз, що відображає ймовірність реалізації несприятливого сценарію; C – величина наслідків втрати функціональності системи водоочищення.

Цей вираз чітко ілюструє, що для ефективного управління ризиками необхідно працювати над двома основними напрямками: 1) зниження загальної вразливості ($V_{\text{заг}}$), що досягається шляхом підвищення стійкості системи до загроз (зміцнення захисту, резервування, підвищення автономності) та покращення її відновлювальних можливостей. Чим нижча вразливість, тим менша ймовірність настання негативної події; 2) зменшення масштабу наслідків (C), який досягається, навіть, якщо загроза реалізувалася, то можна мінімізувати шкоду через оперативне реагування, наявність аварійних планів, систем оповіщення, а також через попереднє страхування або створення резервних фондів.

Таким чином, застосування даного виразу (6) дозволяє раціоналізувати пріоритетність зусиль у забезпеченні функціональної стійкості. Фокусування на зниженні $V_{\text{заг}}$ у найбільш критичних станах та одночасна розробка заходів для зменшення C є необхідними умовами для досягнення максимального зниження загального ризику та забезпечення стабільного водопостачання в умовах динамічних зовнішніх загроз.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Дане дослідження, яке присвячене ефективному управлінню ризиками систем водоочищення через визначення критеріїв для кі-

лькісної оцінки стійкості та вразливості, дозволило сформулювати низку ключових висновків.

1. Розширено концепцію оцінки надійності. Дослідження довело необхідність і можливість інтеграції понять стійкості та вразливості в традиційну оцінку надійності систем водоочищення. Це забезпечує більш повне уявлення про комплексну надійність (R_C) функціонування в умовах різнопланових зовнішніх загроз (техногенних, природних, воєнних).

2. Розроблено систему кількісних критеріїв стійкості. Сформовано підхід та виведено математичні залежності для об'єктивної кількісної оцінки загальної стійкості ($S_{\text{заг}}$). Цей показник об'єднує часткові коефіцієнти, що характеризують специфічну резистентність до кожного типу загрози ($S_{\text{техн}}$, $S_{\text{природн}}$, $S_{\text{воєн}}$), а також коефіцієнт відновлювальних можливостей ($K_{\text{відн}}$), який відображає здатність системи до швидкого відновлення.

3. Визначено критерії кількісної оцінки вразливості. Обґрунтовано та представлено математичні залежності для розрахунку вразливості ($V_{\text{заг}}$) системи, представленої як $1 - S_{\text{заг}}$. Це дозволяє не лише загально оцінити схильність системи до негативних наслідків, а й ідентифікувати конкретні «слабкі ланки» через аналіз часткових критеріїв вразливості (V_{Gj}).

4. Обґрунтовано практичну цінність підходу для ефективного управління ризиками. Запропоновані критерії надають об'єктивний інструментарій для ефективного управління ризиками в системах водоочищення і дозволяють обґрунтовано зосереджувати увагу на захисних заходах та інвестиціях, спрямовуючи ресурси на найбільш вразливі ланки системи, що потребують першочергового зміцнення.

5. Створено основу для ефективного управління безпекою. Кількісна оцінка стійкості та вразливості забезпечує можливість розробки та впровадження стратегій підвищення безпеки, спрямованих на забезпечення сталого та безперебійного водопостачання в умовах зростаючої невизначеності й потенційних загроз.

ЛІТЕРАТУРА

1. **ДСТУ 2860-94.** Надійність техніки. Терміни та визначення. Київ: Держстандарт України, 1994. 92 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=25034
2. **ДСТУ 2862-94.** Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги. Київ: Держстандарт України, 1995. 38 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=53946
3. **Петросов В. А.** Стійкість водопостачання. Харків: Фактор, 2007. 360 с. URL: <http://www.amac.md/biblioteca/data/24/17/87.pdf>
4. **Бабасв В. М., Корінько І. В., Панасенко О. О., Душкін С. С.** Вода і тероризм. Водопостачання та водовідведення. Розділ «Екологія». 2014. № 4. С. 49 – 58. URL: <https://www.waterwork.kiev.ua/uk/>
5. **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. S. 95 – 101. ISSN 2071-2227, E-ISSN 2223-2362. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-1>.
6. **Henley E. J., Kumamoto H.** Reliability Engineering and Risk Assessment. By Englewood Cliffs, Prentice-Hall, New Jersey, 07632. 1981. 528 p. ISBN-0-13-772251-6. URL: <https://surl.li/cabxdq>.
7. **Лисиченко Г. В., Забулонов Ю. Л., Хміль Г. А.** Природний, техногенний та екологічний ризики: аналіз, оцінка, управління. Київ: Наукова думка, 2008. 543 с. URL: <https://www.nas.gov.ua/UA/Book/Pages/default.aspx?BookID=0000012597>

REFERENCES

1. **DSTU 2860-94. (1994).** Reliability of equipment. Terms and definitions. Kyiv: State Standard of Ukraine. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=25034 [in Ukrainian].
2. **DSTU 2862-94. (1995).** Reliability of equipment. Methods for calculating reliability indicators. General requirements. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy. 38 p. https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=53946 [in Ukrainian].
3. **Petrosov, V. A. (2007).** Stikist vodopostachannia. Kharkiv: Faktor. Retrieved from

<http://www.amac.md/biblioteca/data/24/17/87.pdf>
[in Ukrainian].

4. **Babaiev, V. M., Korinko, I. V., Panasenko, O. O., & Dushkin, S. S. (2014).** Voda i teroryzm. *Vodopostachannia ta vodovidvedennia. Ekolohiia*, 4, 49–58. Retrieved from

<https://www.waterwork.kiev.ua/uk/> [in Ukrainian].

5. **Uriadnikova, I. V., Lebedev, V. H., Zaplatynskiy, 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. ISSN 2071-2227, E-ISSN 2223-2362.

<https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-1>.

[in Ukrainian].

6. **Henly, E. J., & Kumamoto, H. (1984).** *Reliability Engineering and Risk Assessment*. By Englewood Cliffs, Prentice-Hall, New Jersey, 07632. ISBN-0-13-772251-6. Retrieved from <https://surl.li/cabxdq>.

7. **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].

Determination of criteria for assessing the resilience and vulnerability of water treatment systems for effective risk management

Inga Uriadnikova

Abstract. Current issues in the field of water supply, especially for critical infrastructure facilities, such as water treatment systems, are not only increasing the efficiency of production processes and reducing energy costs, but also ensuring their stability and vulnerability in the face of multiple external threats. Analysis of the causes of industrial accidents and damage, as well as the consequences of natural disasters and military actions, shows that the disruption of the functioning of water treatment systems is characterized by a combination of random events that occur with different frequency and intensity at different stages of their operation. In order to determine and substantiate the criteria for quantitatively assessing the stability and vulnerability of the functioning of water treatment systems under the influence of threats of a technogenic, natural and military nature for effective risk management in water treatment systems, a study was conducted that included the division of the concept of reliability into internal reliability, stability and vulnerability. Analysis of the results obtained showed that: 1) the concept of reliability assessment has been expanded. The study proved the necessity and possibility of integrating the concepts of resilience and vulnerability into the traditional assessment of the reliability of water treatment systems, which provides a more complete picture of the complex reliability of functioning in conditions of diverse external threats (technogenic, natural, military); 2) a system of quantitative resilience criteria was developed, and an approach was formed, and mathematical dependencies were derived for an objective quantitative assessment of overall resilience. This indicator combines partial coefficients characterizing the specific resistance to each type of threat, as well as the coefficient of recovery capabilities, which reflects the system's ability to quickly recover; 3) The criteria for quantitative assessment of vulnerability are determined and mathematical dependencies for calculating the vulnerability of the system are substantiated and presented, which allows not only to generally assess the system's susceptibility to negative consequences, but also to identify specific «weak links» through the analysis of partial vulnerability criteria; 4) the practical value of the approach for effective risk management is substantiated. The proposed criteria provide an objective toolkit for effective risk management in water treatment systems and allow reasonably focusing attention on protective measures and investments, directing resources to the most vulnerable parts of the system that require priority strengthening; 5) the created basis for effective security management provides for the possibility of quantitative assessment of stability and vulnerability, which ensures the development and implementation of security improvement strategies for the purpose of sustainable and uninterrupted water supply in conditions of growing uncertainty and potential threats.

Keywords: sustainability, vulnerability, reliability, safety, technogenic risks, water treatment systems.

Стаття надійшла до редакції 31.07.2025