

ІНТЕГРАЛЬНА ОЦІНКА ТЕХНОГЕННОГО РИЗИКУ СИСТЕМ ВОДОПОСТАЧАННЯ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИХ ПІДПРИЄМСТВ В УМОВАХ ВОЄННИХ ЗАГРОЗ

Інга Уряднікова

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

DOI: 10.32347/2524-0021.2026.53.56-61

Анотація. В умовах зростаючої нестабільності та підвищеної небезпеки для об'єктів критичної інфраструктури особливої актуальності набувають питання управління техногенними ризиками систем водопостачання теплоенергетичних підприємств. Порушення їх функціонування внаслідок техногенних аварій, природних впливів та воєнних загроз може призводити до значних економічних, екологічних і соціальних наслідків, що зумовлює необхідність переходу від локального реагування на аварійні та воєнні впливи до інтегрованої оцінки та управління техногенними ризиками. Аналіз сучасних аварійних ситуацій і пошкоджень інфраструктури свідчить, що ризик формується як результат взаємодії ймовірності небезпечних подій, тяжкості їхніх наслідків та рівня підготовленості системи до протидії таким загрозам. З метою підвищення ефективності управління техногенними ризиками у роботі розроблено математичний підхід, що інтегрує оцінку ймовірності подій, тяжкості наслідків та ефективності управлінських заходів з урахуванням синергетичного ефекту їх одночасного застосування. У межах дослідження сформовано модель інтегрального техногенного ризику, яка дозволяє кількісно оцінювати вплив окремих техногенних і воєнних загроз на функціонування систем водопостачання теплоенергетичних підприємств та визначати оптимальний набір заходів для мінімізації ризику за умов обмежених ресурсів. Аналіз результатів моделювання показав, що: 1) запропонований підхід дозволяє кількісно враховувати тяжкість наслідків аварійних та воєнних подій, що істотно підвищує об'єктивність оцінки інтегрального ризику; 2) введення показника ефективності управлінських заходів забезпечує можливість оцінки їх впливу на зниження ризику та порівняння альтернативних стратегій управління; 3) модель дозволяє ідентифікувати критичні елементи системи водопостачання, найбільш уразливі до техногенних та воєнних загроз, що забезпечує пріоритетність їх захисту та зміцнення; 4) застосування методів оптимізації створює підґрунтя для обґрунтованого розподілу ресурсів і підвищення стійкості систем у кризових умовах; 5) запропонований підхід формує основу для розробки стратегій підвищення безпеки та надійності систем водопостачання теплоенергетичних підприємств, спрямованих на зменшення негативних наслідків техногенних аварій і воєнних загроз та забезпечення сталого функціонування критичної інфраструктури в умовах високої невизначеності.

Ключові слова: техногенний ризик, управління ризиками, ефективність заходів, тяжкість наслідків, воєнні загрози, системи водопостачання теплоенергетичних підприємств.

ВСТУП

Системи водопостачання теплоенергетичних підприємств належать до об'єктів критичної інфраструктури, функціонування яких безпосередньо визначає рівень енергетичної безпеки, стабільність роботи тепло-

електростанцій, а також надійність забезпечення населення й промислових споживачів питною та технічною водою. [1,2]. Питання надійності та безпеки таких систем традиційно розглядаються в межах теорії надійності технічних систем, що регламентується відповідними нормативними документами

та стандартами [3, 4]. В умовах сучасних викликів, що включають воєнні загрози, технологічні аварії та природні катастрофи, забезпечення надійності та безпеки систем водопостачання стає надзвичайно актуальним завданням [5, 6]. Дослідження причин аварійних ситуацій у системах водопостачання показують, що порушення функціонування об'єктів водоочищення і транспортування води мають комплексний характер та часто обумовлені взаємодією техногенних, природних і соціально-політичних факторів, серед яких особливе місце займають воєнні дії, що спричиняють як прямі ушкодження інфраструктури, так і непрямі наслідки у вигляді обмеження ресурсів, перебоїв у постачанні енергоресурсів [5]. У таких умовах традиційні підходи до оцінки надійності систем водопостачання, що ґрунтуються на використанні фіксованих нормативних показників безпеки та усереднених розрахункових характеристик [3, 4], виявляються недостатніми для ефективного управління ризиками та прийняття стратегічних рішень щодо інвестування у захисні заходи й підвищення стійкості системи. Зазначені підходи, як правило, не враховують динамічної зміни умов експлуатації, зростання інтенсивності та непередбачуваності воєнних загроз, можливості одночасного ураження кількох критичних елементів інфраструктури, а також обмежень, пов'язаних із дефіцитом ресурсів і ускладненням відновлювальних робіт у період воєнних дій, що суттєво знижує їхню ефективність у кризових та нестандартних ситуаціях [6, 7].

Одним із перспективних підходів є інтеграція концепцій ризику, стійкості та вразливості в рамках єдиного математичного моделювання, що дозволяє кількісно оцінювати ймовірність негативних подій, тяжкість їх наслідків та ефективність управлінських заходів [1, 2, 7, 8]. Оптимізація заходів управління техногенними ризиками передбачає вибір таких дій та їх інтенсивності у часі, які мінімізують інтегральний ризик системи з урахуванням обмежених ресурсів, часу відновлення критичних елементів та пріоритетності захисту ключових вузлів [2, 7]. Впро-

вадження методів оптимізації на основі дискретизації часу та застосування алгоритмів нелінійного програмування або еволюційних методів дозволяє визначити оптимальний розподіл управлінських заходів у динамічному середовищі, враховуючи як прямі, так і непрямі наслідки потенційних загроз [2, 7].

Практичне застосування запропонованого підходу забезпечить можливість прогнозування розвитку ризикових ситуацій, раннього виявлення найбільш вразливих елементів системи та планування ресурсів для їх ефективного захисту, що є особливо актуальним у контексті сучасних воєнних конфліктів та непередбачуваних зовнішніх впливів [2, 5].

Таким чином, інтеграція оцінки ризику з урахуванням тяжкості наслідків та ефективності управлінських заходів формує надійну науково-практичну основу для прийняття обґрунтованих рішень щодо підвищення безпеки та стійкості систем водопостачання теплоенергетичних підприємств, забезпечує ефективне використання ресурсів та сприяє сталому та безперебійному функціонуванню критичної інфраструктури в умовах зростаючої невизначеності [1, 2, 6, 7].

МЕТА І МЕТОДИ

Метою дослідження є розробка математичної моделі оптимізації заходів управління техногенними ризиками систем водопостачання теплоенергетичних підприємств в умовах воєнних загроз для оцінки інтегрального техногенного ризику з урахуванням тяжкості наслідків та ефективності управлінських заходів і визначення пріоритетів підвищення стійкості критичних елементів системи [1, 2, 6].

Дослідження виконано на основі інтеграції концепцій техногенного ризику, тяжкості наслідків та ефективності управлінських заходів із застосуванням математичного моделювання та оптимізації [2, 6, 7, 8].

Для оцінки інтегрального техногенного ризику систем водопостачання теплоенергетичних підприємств використано модель, яка враховує ймовірність настання потен-

ційно небезпечних подій, тяжкість їх наслідків та синергетичний ефект одночасного застосування кількох управлінських заходів [2, 7]. Часовий інтервал моделювання розбивався на дискретні кроки, що дозволяло обчислювати інтегральний ризик як суму добутків ймовірності подій та тяжкості наслідків, скоригованих ефективністю заходів управління [2, 7].

Оптимізація заходів проводилась із використанням методів нелінійного програмування, що забезпечує мінімізацію інтегрального ризику за заданий період та дозволяє враховувати обмеження ресурсів, пріоритетність захисту критичних елементів і технічні можливості відновлення системи. Для чисельного моделювання використовувалися градієнтні методи у випадках, коли функції ефективності управлінських заходів є гладкими та диференційованими, а також еволюційні алгоритми для розв'язання задач оптимізації зі складними нелінійними та синергетичними взаємодіями між заходами, за наявності порогових ефектів, багатьох локальних мінімумів і відсутності аналітично визначених похідних [2, 7]. Такий підхід забезпечує можливість проведення сценарного аналізу формування техногенного ризику, кількісної оцінки впливу окремих подій та комплексних техногенних і воєнних загроз, а також ідентифікації критичних елементів системи, функціонування яких визначає загальний рівень ризику та які потребують першочергового зміцнення і захисту [1, 2].

У межах даного дослідження як приклад використано технологічну схему електрокоагуляційної установки для пом'якшення та очищення стічних вод теплоенергетичних підприємств. Ця схема є результатом попередніх досліджень і детально викладена в роботі [2]. Дослідження технологічної схеми електрокоагуляційної установки дозволило проаналізувати роботу моделі на конкретному прикладі, перевірити її функціональність, оцінити адекватність відображення реальних процесів та визначити ефективність запропонованих заходів управління техногенним ризиком, що є особливо актуальним в умовах воєнних загроз [2].

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ПОЯСНЕННЯ

Для ефективного управління техногенними ризиками систем водопостачання теплоенергетичних підприємств необхідно не лише оцінювати ймовірність негативних подій та тяжкість їх наслідків, а й кількісно визначати ефективність заходів управління [2, 6, 7].

Математичне моделювання дозволяє формалізувати ці залежності та розробити оптимальні стратегії мінімізації інтегрального техногенного ризику, враховуючи обмежені ресурси, пріоритетність захисту критичних елементів і можливості швидкого відновлення системи після аварійних ситуацій [2, 7]. Розроблена модель дозволяє враховувати обмежені ресурси, пріоритетність захисту критичних елементів, часові та технологічні обмеження, а також можливості швидкого відновлення системи після аварійних або воєнних ситуацій, забезпечуючи комплексну оцінку потенційних ризиків та оптимальний розподіл управлінських дій у динамічному середовищі.

З цією метою інтегральний техногенний ризик системи ми будемо визначати як добуток базового ризику та ефективності управлінських заходів [2, 7]:

$$R_{\text{еф}}(t) = R_0(t) \cdot (1 - E(t)), \quad (1)$$

де $R_{\text{еф}}$ – інтегральний техногенний ризик після застосування заходів, $R_0(t)$ – базовий ризик без заходів управління, а $E(t)$ – показник ефективності управлінських заходів у момент часу t , що змінюється від 0 до 1. Значення $E(t) = 0$ відповідає відсутності заходів, а $E(t) = 1$ означає повне усунення ризику завдяки максимально ефективним діям.

До управлінських заходів можна віднести: модернізацію обладнання, підвищення кваліфікації персоналу, впровадження систем раннього виявлення аварій, резервування критичних вузлів та планування ресурсів для швидкого відновлення після пошкоджень. Представлена модель оцінки управлінських заходів дозволяє кількісно визначати вплив конкретних дій на зниження інтегрального ризику, а також визначати оптимальний розподіл ресурсів і інтенсивність заходів для мінімізації ризику.

Тоді базовий ризик системи визначимо як суму добутоків ймовірності події та тяжкості її наслідків:

$$R_0(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t) \cdot C_i(t), \quad (2)$$

де, $P_i(t)$ – ймовірність настання події типу i , $C_i(t)$ – тяжкість наслідків події i , а n – кількість потенційно небезпечних подій. Така структура дозволяє враховувати різну частоту і масштаб наслідків кожної події, що виникає на різних етапах функціонування системи водопостачання, включно з техногенними аваріями та наслідками воєнних загроз.

Якщо застосовується кілька управлінських заходів (m типів), їхня сумарна ефективність обчислюється із врахуванням синергетичного ефекту:

$$E(t) = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - E_j(t)), \quad (3)$$

де, $E_j(t)$ – ефективність конкретного заходу j . Така формалізація враховує, що одночасне застосування декількох заходів може дати більший ефект на зниження ризику, ніж просте сумування індивідуальних ефектів.

Мета оптимізації заходів управління техногенними ризиками систем водопостачання теплоенергетичних підприємств полягає у мінімізації інтегрального ризику за період часу T :

$$\begin{aligned} & \min_{E_j(t)} \int_0^T R_{\text{еф}}(t) dt = \\ & = \min_{E_j(t)} \int_0^T \sum_{i=1}^n P_i(t) \cdot C_i(t) \cdot (1 - E(t)) dt, \quad (4) \end{aligned}$$

при цьому враховуються обмеження ресурсів, пріоритетність захисту критичних елементів та технічні можливості відновлення системи.

Дискретизація часу Δt разом із градієнтними методами та еволюційними алгоритмами дозволяє чисельно моделювати систему та визначати оптимальні управлінські заходи для мінімізації інтегрального ризику.

Таким чином, на основі наведених вище математичних залежностей інтегральний техногенний ризик систем водопостачання теплоенергетичних підприємств можна представити наступним виразом:

$$R_{\text{int}} = \sum_{i=1}^n P_i \cdot C_i \cdot (1 - E_i), \quad (5)$$

де, R_{int} – інтегральний техногенний ризик системи; P_i – ймовірність настання небезпечної події i -го типу; C_i –тяжкість наслідків події i для системи водопостачання; E_i – ефективність управлінських заходів, спрямованих на зменшення наслідків події i ; n – загальна кількість потенційно небезпечних подій, що враховуються.

Слід відмітити, що запропонована модель дозволяє проводити кількісну оцінку впливу окремих техногенних і воєнних загроз, визначати критичні елементи системи та ідентифікувати найбільш уразливі ланки, що потребують першочергового зміцнення. Вона також забезпечує сценарний аналіз розвитку техногенного ризику та комплексних загроз, що дозволяє оцінити ефективність окремих заходів та комплексних стратегій управління ризиком.

Практична цінність підходу полягає у можливості планування ресурсів, пріоритетного розподілу захисних заходів, підвищенні стійкості системи та забезпеченні безперебійного функціонування критичної інфраструктури в умовах високої невизначеності та воєнних загроз.

Застосування моделі дозволяє прогнозувати наслідки аварій і воєнних дій, оптимізувати комплекс заходів для мінімізації інтегрального ризику та забезпечити обґрунтоване прийняття рішень щодо захисту та зміцнення ключових вузлів системи.

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Розроблено математичну модель інтегрального техногенного ризику систем водопостачання теплоенергетичних підприємств, яка враховує ймовірність настання небезпечних подій, тяжкість їхніх наслідків та ефективність управлінських заходів, включно з потенційними воєнними загрозами.

2. Використання моделі забезпечує можливість визначення критичних елементів системи, найбільш уразливих до техногенних і воєнних впливів, що дозволяє обґрунтовано формувати пріоритети при плануванні заходів щодо підвищення стійкості та безпеки систем водопостачання.

3. Модель надає можливість враховувати синергетичний ефект одночасного застосування кількох управлінських заходів, що дозволяє оцінювати комплексні стратегії управління та обирати оптимальні рішення для мінімізації інтегрального ризику з урахуванням обмежених ресурсів.

4. Застосування моделі забезпечує проведення аналізу розвитку аварійних і воєнних ситуацій, прогнозування їхніх наслідків та кількісну оцінку ефективності управлінських заходів у різних умовах функціонування системи.

5. Практична цінність підходу полягає у створенні інструментарію для обґрунтованого планування ресурсів, підвищення надійності та стійкості систем водопостачання теплоенергетичних підприємств, мінімізації економічних втрат і забезпеченні безперебійного функціонування об'єктів критичної інфраструктури в умовах зростання техногенних і воєнних загроз.

6. Рекомендовано застосовувати модель для ідентифікації критичних елементів системи та визначення пріоритетності заходів щодо їх захисту та зміцнення.

7. Доцільно інтегрувати оцінку ефективності кількох управлінських заходів для розробки оптимальних стратегій мінімізації інтегрального ризику з урахуванням обмежених ресурсів та можливостей швидкого відновлення системи.

ЛІТЕРАТУРА

1. **Петросов В. А.** Стійкість водопостачання. Харків: Фактор, 2007. 360 с.
2. **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.
3. **ДСТУ 2860-94.** Надійність техніки. Терміни та визначення [Електронний ресурс]. URL: https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_2860_94_nadijnist_tekhniki_termini_ta_viznachennja/5-1-0-1209
4. **ДСТУ 2862-94.** Надійність техніки. Методи розрахунку показників надійності. Загальні вимоги. Київ: Держстандарт України, 1995. 38 с.

5. **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.

6. **Лисиченко Г. В., Забулонов Ю. Л., Хміль Г. А.** Природний, техногенний та екологічний ризику: аналіз, оцінка, управління. Київ: Наукова думка, 2008. 543 с.

7. **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.

8. **Уряднікова І. В.** Дослідження взаємозв'язку надійності, ризиків і безпеки систем водоочищення // *Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки*, 2025, 49, 85-93.

REFERENCES

1. **Petrosov, V. A. (2007).** Stiikest vodopostachannia. Kharkiv: Faktor. Retrieved from <http://www.amac.md/biblioteca/data/24/17/87.pdf> [in Ukrainian].
2. **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/2022-1/095> [in Ukrainian].
3. **Institute of Reliability Problems of Machines and Structures (1994).** DSTU 2860-94. Reliability of equipment. Terms and definitions. Kyiv: State Standard of Ukraine. Retrieved from https://dbn.co.ua/load/normativy/dstu/dstu_2860_94_nadijnist_tekhniki_termini_ta_viznachennja/5-1-0-1209 [in Ukrainian].
4. **Association "Reliability of Machines and Structures" (1995).** DSTU 2862-94. 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].
5. **Babaiev, V. M., Korinko, I. V., Panasenko, O. O., & Dushkin, S. S. (2014).** Voda i teroryzm. Vodopostachannia ta vodovidvedennia. Rozdil «Ekolohiia». 4. 49–58. [in Ukrainian].
6. **Henly, E. J., & Kumamoto, H. (1981).** 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].

8. **Uriadnikova, I. (2025)**. Research on the interrelationship between reliability, risks and

safety of water treatment systems. *Problems of Water Supply, Sewerage and Hydraulic*, (49), 85–93. <https://doi.org/10.32347/2524-0021.2025.49.85-93> .

Integrated assessment of technogenic risks in water supply systems of thermal power enterprises under military threats

Inga Uriadnikova

Abstract. Under conditions of increasing instability and elevated threats to critical infrastructure, issues related to technogenic risk management in water supply systems of thermal power enterprises are becoming particularly relevant. Disruptions in their operation caused by technogenic accidents, natural impacts, and military threats may lead to significant economic, environmental, and social consequences, necessitating a transition from reactive approaches to proactive risk management. An analysis of recent accidents and infrastructure damage indicates that risk is formed as a result of the interaction between the probability of hazardous events, the severity of their consequences, and the level of system preparedness to withstand such threats. To enhance the effectiveness of technogenic risk management, this study develops a mathematical approach that integrates the assessment of event probabilities, consequence severity, and the effectiveness of management measures, taking into account the synergistic effects of their simultaneous implementation. Within the framework of the research, an integral risk model is formulated, enabling a quantitative evaluation of the impact of individual technogenic and military threats on the operation of water supply systems in thermal power engineering and the identification of an optimal set of measures for risk minimization under limited resource conditions. The analysis of the modeling results demonstrates that: 1) the proposed approach allows for the quantitative incorporation of the severity of consequences of accident-related and military events, significantly improving the objectivity of integral risk assessment; 2) the introduction of an effectiveness indicator for management measures enables the evaluation of their impact on risk reduction and the comparison of alternative management strategies; 3) the model facilitates the identification of critical elements of water supply systems that are most vulnerable to technogenic and military threats, thereby ensuring the prioritization of their protection and reinforcement; 4) the application of optimization methods provides a sound basis for rational resource allocation and enhanced system resilience under crisis conditions; and 5) the proposed approach establishes a foundation for the development of strategies aimed at improving the safety and reliability of water supply systems in thermal power engineering, reducing the negative consequences of technogenic accidents and military threats, and ensuring the sustainable operation of critical infrastructure under conditions of high uncertainty.

Keywords: technogenic risk, risk management, effectiveness of management measures, severity of consequences, military threats, water supply systems of thermal power enterprises.

Дата першого надходження рукопису 07.01.2026

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування 24.01.2026

Дата публікації 31.03.2026