

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ПОТАПЕНКО СВІТЛАНА ПАВЛІВНА

УДК 628.1.2.3

ДИСЕРТАЦІЯ

ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ СИСТЕМ ПИТНОГО
ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ВОДОВІДВЕДЕННЯ

Спеціальність: 192 – Будівництво та цивільна інженерія

Галузь знань: 19 – Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії вперше

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____Потапенко Світлана Павлівна

Науковий керівник: Кравченко Олександр Валерійович, доктор технічних наук

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Потапенко С.П. Підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» (19 – Архітектура та будівництво). – Київський національний університет будівництва і архітектури Міністерства освіти і науки України, Київ, 2026.

Дисертаційна робота присвячена науковому обґрунтуванню та розробленню методів і моделей підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення в умовах кризових, воєнних, техногенних, енергетичних та екологічних факторів. У роботі обґрунтовано необхідність переходу від традиційної концепції статичної надійності окремих елементів інфраструктури до концепції динамічної стійкості (резильєнтності), що передбачає здатність системи зберігати критичні функції, адаптуватися до деструктивного впливу та відновлювати працездатність після аварійних і надзвичайних ситуацій.

Розроблено логіко – математичну формалізацію задачі підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення як багатокритеріальної проблеми прийняття рішень. Запропоновано інтегральний індекс стійкості $R(S)$, який враховує технічні, енергетичні, експлуатаційні та безпекові параметри функціонування системи. Сформовано комплексну систему індикаторних показників для оцінювання поточного стану і потенціалу розвитку інфраструктури, а також розроблено методологію побудови багатокритеріальної матриці ризиків для ідентифікації, класифікації та ранжування воєнних, техногенних і хімічних, біологічних, радіаційних та ядерних загроз.

Науково обґрунтовано доцільність впровадження децентралізованих і мобільних технологічних рішень як складової підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення. Зокрема, розглянуто застосування мобільних модулів доочищення води із системами дозування порошкового активованого вугілля як універсального сорбційного бар'єра, автономних енергоефективних комплексів,

резервних вузлів живлення та «насосів блекауту». Обґрунтовано використання геопросторового аналізу та гідравлічного моделювання для верифікації технічних рішень, прогнозування зміни тиску в мережах і моделювання сценаріїв каскадних відмов.

Практичне значення результатів полягає у створенні науково – методичного та прикладного інструментарію для планування, оптимізації й підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення територіальних громад. Результати дослідження використано під час створення Порядків розроблення схем оптимізації систем централізованого водопостачання та водовідведення, затверджених наказом Міністерства розвитку громад та територій України від 12 червня 2025 року № 986, що зареєстрований у Міністерстві юстиції України 11 серпня 2025 року за №1183/44589 (далі – Порядки) [73]. Запропоновані методи, моделі та алгоритми апробовано на об'єктах критичної інфраструктури міста Дніпро під час формування міської стратегії підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення.

Ключові слова: водовідведення, водопостачання, енергоефективність, критична інфраструктура, математична модель, оптимізація, очистка стічних вод, питна вода, ресурсозбереження, ризики, схеми, системи, стійкість, стічні води, якість води.

ANNOTATION

Potapenko S. P. Improving the resilience of drinking water supply and sanitation systems. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 192 «Building and Civil Engineering» (19 – Architecture and Construction). – Kyiv National University of Construction and Architecture of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2026.

The dissertation is devoted to the scientific substantiation and development of methods and models for improving the resilience of drinking water supply and wastewater disposal systems under crisis, military, technogenic, energy-related, and environmental factors. The

study substantiates the necessity of transitioning from the traditional concept of static reliability of individual infrastructure elements to the concept of dynamic resilience, which involves the ability of a system to maintain critical functions, adapt to destructive impacts, and restore operability after accidents and emergencies.

A logical and mathematical formalization of the task of improving the resilience of drinking water supply and wastewater disposal systems as a multicriteria decision-making problem has been developed. An integral resilience index $R(S)$ has been proposed, which takes into account the technical, energy-related, operational, and safety parameters of system functioning. A comprehensive system of indicator parameters has been formed for assessing the current state and development potential of infrastructure, and a methodology for constructing a multicriteria risk matrix has been developed to identify, classify, and rank military, technogenic, and chemical, biological, radiological, and nuclear threats.

The expediency of implementing decentralized and mobile technological solutions as a component of improving the survivability of drinking water supply and wastewater disposal systems has been scientifically substantiated. In particular, the use of mobile water post-treatment modules with powdered activated carbon dosing systems as a universal sorption barrier, autonomous energy-efficient complexes, backup power supply units, and “blackout pumps” has been considered. The application of geospatial analysis and hydraulic modeling has been substantiated for the verification of technical solutions, forecasting pressure changes in networks, and modeling cascading failure scenarios.

The practical significance of the results lies in the creation of scientific-methodological and applied tools for planning, optimizing, and improving the resilience of drinking water supply and wastewater disposal systems of territorial communities. The research results were used in the development of the Procedures for developing optimization schemes for centralized water supply and wastewater disposal systems, approved by Order No. 986 of the Ministry for Communities and Territories Development of Ukraine dated June 12, 2025, and registered with the Ministry of Justice of Ukraine on August 11, 2025, under No. 1183/44589 (hereinafter referred to as the Procedures) [73]. The proposed methods, models, and algorithms were tested at critical infrastructure facilities in the city of Dnipro during the development of the municipal strategy for improving the resilience of drinking water supply

and wastewater disposal systems.

Keywords: wastewater disposal, water supply, energy efficiency, critical infrastructure, mathematical model, optimization, wastewater treatment, drinking water, resource conservation, risks, schemes, systems, resilience, wastewater, water quality.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. О. Кравченко, Т. Аргатенко, С. Потапенко, Т. Куба Забезпечення енергетичної сталості та енергоефективності систем питного водопостачання та водовідведення: роль децентралізованих технологій у кризових ситуаціях, Науково-технічний журнал «Енергетичні технології та ресурсозбереження». 2025. 85 (4). С. 54–69. DOI: 10.33070/etars.4.2025.04. **(SCOPUS, Q4)**

Особистий внесок здобувача полягає у здійсненні аналізу ключових вразливостей систем питного водопостачання та водовідведення великих міст, проведенні детального аналізу та класифікації ризиків для об'єктів критичної інфраструктури, оцінці нових нормативних підходів до розроблення схем оптимізації як інструменту довгострокового планування стійкості та енергоефективності, а також у формуванні концептуальних засад інтегрованої моделі підвищення стійкості інфраструктури.

2. Кравченко О., Кобилянський В., Аргатенко Т., Нечипор О., Потапенко С. (2025). Аналіз ризиків здоров'ю населення через недотримання вимог ДСанПіН 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною». Фітотерапія. Часопис, 4, 119–132, DOI: 10.32782/2522-9680-2025-4-19. **(SCOPUS, Q4)**

Особистий внесок здобувача полягає у здійсненні аналізу вимог до якості питної води та проведенні порівняльного оцінювання вітчизняних і міжнародних стандартів, що формує санітарно-епідеміологічне обґрунтування для розробки стратегій підвищення стійкості та надійності систем питного водопостачання.

3. О. Кравченко, С. Потапенко, Т. Аргатенко, Г. Роговська. Ризики застосування газоподібного хлору на водоочисних станціях під час воєнних дій, Науково-технічний збірник КНУБА № 43 (2023) Проблеми водопостачання, водовідведення та

гідравліки, С. 29–35. DOI: 10.32347/2524-0021.2023.43.29-35. **(Фахове видання)**

Особистий внесок здобувача полягає у здійсненні оцінки ризиків застосування газоподібного хлору під час бойових дій та обґрунтуванні доцільності переходу на безпечніші альтернативні методи знезараження питної води, що є невід’ємною складовою забезпечення стабільного питного водопостачання та підвищення загальної стійкості інфраструктури у кризових умовах.

4. О. Кравченко, Т. Куба, С. Потапенко, В. Хоружий, Т. Аргатенко, О. Бакуновський. Планування та організація децентралізованих систем водопостачання у воєнний період в Україні, Науково-технічний збірник КНУБА № 44 (2023) Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, С. 29–39. DOI: 10.32347/2524-0021.2023.44.29-39. **(Фахове видання)**

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі та розробленні концептуальних засад планування й організації децентралізованих систем питного водопостачання в умовах воєнного стану як елемента підвищення загальної стійкості інфраструктури.

5. О. Кравченко, С. Потапенко, Т. Куба, Т. Аргатенко. Вимоги до гідравлічного моделювання мереж водопостачання у воєнний час та для управління ризиками ХБРЯ-забруднень, Науково-технічний збірник КНУБА № 45 (2023) Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, С. 32–38. DOI: 10.32347/2524-0021.2023.45.32-38. **(Фахове видання)**

Особистий внесок здобувача полягає в обґрунтуванні методів управління ризиками хімічного, біологічного, радіаційного і ядерного (ХБРЯ) забруднення як необхідної складової для забезпечення надійності та підвищення стійкості систем питного водопостачання.

6. С. Потапенко, О. Кравченко. Основні проблеми функціонування існуючих систем водопостачання та водовідведення в Україні, Науково-технічний збірник КНУБА № 46 (2024) Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, С. 35–42. DOI: 10.32347/2524-0021.2024.46.35-42. **(Фахове видання)**

Особистий внесок здобувача полягає в одноосібному здійсненні аналізу нагальних проблем сфери питного водопостачання та водовідведення в умовах війни,

а також у самостійному розробленні концептуальних засад нової методики оптимізації систем питного водопостачання та водовідведення.

7. О. Кравченко, Т. Куба, С. Потапенко, О. Нечипор, Н. Таварткіладзе, О. Бакуновський. Розробка пілотної установки для удосконалення технології очищення води на Деснянській водопровідній станції м. Києва, Науково-технічний збірник КНУБА № 47 (2024) Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, С. 23–28. DOI: 10.32347/2524-0021.2024.47.23-28. **(Фахове видання)**

Особистий внесок здобувача полягає в участі в аналізі ефективності існуючих методів водопідготовки та загальному обґрунтуванні напрямків їх модернізації, що є важливим елементом комплексної стратегії підвищення стійкості функціонування систем питного водопостачання.

8. С. Потапенко, О. Кравченко. Аналіз світового досвіду та науково-методичні підходи до оптимізації систем питного водопостачання та водовідведення, Науково-технічний збірник КНУБА № 49 (2025) Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, С. 25–37. DOI: 10.32347/2524-0021.2025.49.25-37. **(Фахове видання)**

Особистий внесок здобувача полягає в одноосібному виконанні системного аналізу світового досвіду щодо законодавчого та практичного регулювання питань оптимізації систем питного водопостачання та водовідведення, а також в обґрунтуванні розроблення нових науково-методичних підходів у вигляді проєктів нових Порядків із формування схем оптимізації для забезпечення комплексної стійкості, безпеки та енергоефективності централізованих систем водопостачання та водовідведення.

9. С. Потапенко. Формування показників поточного стану та розвитку систем питного водопостачання та водовідведення, Науковий збірник КНУБА № 13 (2025) Просторовий розвиток, С. 374–390. DOI: 10.32347/2786-7269.2025.13.374-390. **(Фахове видання)**

Особистий внесок здобувача полягає в одноосібній розробці та науковому обґрунтуванні комплексної системи показників поточного стану та розвитку систем питного водопостачання та водовідведення, а також у самостійному створенні логіко-математичної моделі процесу їх формування для оцінювання

стійкості функціонування інфраструктури в межах оптимізації систем населених пунктів.

10. С. Потапенко. Моделі вирішення проблеми підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення, Науково-технічний збірник КНУБА № 74 (2025) Сучасні проблеми архітектури та містобудування, С. 482–498. DOI: 10.32347/2077-3455.2025.74.482-498. **(Фахове видання)**

Особистий внесок здобувача полягає в одноосібній розробці концептуальної багатокритеріальної моделі підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення, а також у самотійному логіко-математичному формалізуванні інтегрального показника стійкості для оптимізації управлінських рішень та зниження вразливості об'єктів критичної інфраструктури в умовах воєнних і техногенних загроз.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. С Потапенко, О Кравченко. Забезпечення перспективного довгострокового планування у сфері водопостачання та водовідведення в Україні, Робоча програма та тези доповідей III-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Ресурси. Енергія. Багатофункціональні еко- та енергоефективні, ресурсозберігаючі технології в архітектурі, будівництві та суміжних галузях», Київ: КНУБА 23–25 листопада 2022. – С. 41–43. – Режим доступу: <https://drive.google.com/file/d/18EwrzZQT9CY2rYUv9-fUiAK88eXdO5uZ/view>.

Особистий внесок здобувача полягає в одноосібному аналізі чинних підходів до довгострокового планування у водопровідно-каналізаційному господарстві та самотійному обґрунтуванні перспективних стратегічних напрямів забезпечення стійкості й надійності функціонування систем питного водопостачання та водовідведення в Україні.

2. С Потапенко, О Кравченко. Забезпечення оптимальної роботи систем питного водопостачання та водовідведення під час війни, «Енергоощадні машини і технології», Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції, 22–24 травня 2024 р. – К.: КНУБА, 2024. – С. 52–55. – Режим доступу:

<https://drive.google.com/file/d/1KQHEqH8PTxV0VgoRR-UCOneQAQ4TnchU/view?ts=66d33d98>.

Особистий внесок здобувача полягає в одноосібному дослідженні чинників впливу військових дій на об'єкти критичної інфраструктури та самостійному обґрунтуванні комплексу інженерно-технологічних заходів для забезпечення оптимальної роботи й підвищення загальної стійкості систем питного водопостачання та водовідведення у кризовий період.

3. С Потапенко, О Кравченко. Забезпечення безпеки питної води для всіх в Україні, Робоча програма та тези доповідей V-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Енергія. Ресурси. Екологія. Багатофункціональні еко- та енергоефективні, ресурсозберігаючі технології в архітектурі, будівництві та суміжних галузях», Київ: КНУБА 27–29 листопада 2024. – С. 69–71. - Режим доступу: <https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/12/ere-2024-ua.pdf>.

Особистий внесок здобувача полягає в одноосібному аналізі сучасних викликів у сфері водопідготовки та самостійному обґрунтуванні стратегічних підходів до забезпечення гарантованої безпеки й доступності питної води для населення, що є базовим елементом підвищення загальної стійкості та надійності функціонування систем водопостачання в Україні.

4. С Потапенко. Управління стійкістю систем питного водопостачання та водовідведення в умовах сучасних викликів, Advanced Technologies in Scientific Research: Collection of Scientific Papers with Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference. International Scientific Unity. August 20–22, 2025. Rotterdam, Netherlands. 16–20 p. URL: <https://isu-conference.com/en/archive/advanced-technologies-in-scientific-research-20-08-25/> , ISBN: 979-8-89704-977-6 (серія), DOI: 10.70286/isu-20.08.2025.001.

Особистий внесок здобувача полягає в одноосібному дослідженні та науковому обґрунтуванні концептуальних засад управління стійкістю систем питного водопостачання та водовідведення в умовах сучасних воєнних, техногенних та екологічних викликів для забезпечення надійності функціонування об'єктів критичної інфраструктури.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

Статті у журналах:

1. О. Кравченко, С. Потапенко. Планування відновлення і розвитку систем водопостачання та водовідведення України у післявоєнний час, виробничо-практичний журнал «Водопостачання та водовідведення» спеціальний випуск лютий 2023, С. 18–21. - Режим доступу: [_https://ukrvodokanal.in.ua/wp-content/uploads/2023/05/zvitnyj-zhurnal_lyutyj-2023.pdf](https://ukrvodokanal.in.ua/wp-content/uploads/2023/05/zvitnyj-zhurnal_lyutyj-2023.pdf).

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі викликів і руйнувань об'єктів критичної інфраструктури в умовах воєнного стану, а також у науковому обґрунтуванні стратегічних підходів до планування післявоєнного відновлення та розвитку систем водопостачання й водовідведення з метою забезпечення їхньої довгострокової стійкості.

Проведені семінари:

2. В рамках заходів Всеукраїнського об'єднання організацій роботодавців «Федерація роботодавців комунальної інфраструктури, енергетики та житлово-комунального господарства України» С. Потапенко 27 лютого 2025 року проведено семінар на тему: «Світовий досвід та нові науково-методичні підходи до оптимізації систем питного водопостачання та водовідведення (нові підходи в законодавстві)» для профільних підприємств, органів місцевого самоврядування, інших зацікавлених сторін, що оприлюднено за посиланням: <https://fru-gkh.com/sites/seminar/20>

Запис можна прослухати за посиланням: https://www.youtube.com/watch?v=fKxL73EiEBk&ab_channel=%D0%A4%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%B0%D0%B2%D1%86%D1%96%D0%B2%D0%96%D0%9A%D0%93%D0%A3%D0%BA%D1%80%D0%B0%D1%97%D0%BD%D0%B8

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	14
ВСТУП.....	16
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ СИСТЕМ ПИТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ВОДОВІДВЕДЕННЯ.....	23
1.1. Світовий та вітчизняний досвід управління системами питного водопостачання та водовідведення.....	23
1.2. Аналіз нормативно – правової бази та системні проблеми інфраструктури України.....	35
1.3. Огляд існуючих науково – методичних підходів до оцінки стійкості систем	42
1.4. Обґрунтування напрямку дисертаційного дослідження.....	47
1.5. Висновки до розділу 1.....	50
РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ТА КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМ ПИТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ВОДОВІДВЕДЕННЯ.....	52
2.1. Характеристика систем питного водопостачання та водовідведення населених пунктів.....	52
2.2. Перспективи розвитку систем питного водопостачання та водовідведення в Україні.....	60
2.3. Науково - методична база дослідження	63
2.4. Концептуальна модель розроблення схем оптимізації	66
2.5. Висновки до розділу 2	69
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМНИХ ПІДХОДІВ ДО ФОРМУВАННЯ СХЕМ ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМ ПИТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ВОДОВІДВЕДЕННЯ	71
3.1. Система індикаторних показників для оцінки стану та ефективності систем питного водопостачання та водовідведення	71

3.2. Розроблення методичного підходу до формування та аналізу альтернативних сценаріїв розвитку	85
3.3. Методологія аналізу, оцінки та управління ризиками у сфері питного водопостачання та водовідведення	90
3.4. Гідравлічне моделювання та геопросторовий аналіз як інструменти обґрунтування технічних рішень	93
3.5. Формування переліку та пріоритизація заходів в оптимальному сценарії.....	104
3.6. Методичний підхід до забезпечення стійкості систем під час надзвичайних ситуацій та у воєнний час.....	107
3.7. Висновки до розділу 3.....	114
РОЗДІЛ 4. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА ОЦІНКА СТІЙКОСТІ СИСТЕМ ПИТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ВОДОВІДВЕДЕННЯ	115
4.1. Формалізація задачі підвищення стійкості як багатокритеріальної проблеми.....	115
4.2. Побудова логіко–математичної моделі стійкості систем питного водопостачання та водовідведення.....	120
4.3. Використання діаграми Ісікави для структурування причинно–наслідкових зв’язків ризиків.....	127
4.4. Алгоритм сценарного моделювання кризових ситуацій.....	130
4.5. Висновки до розділу 4.....	135
РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО – ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІНВЕСТИЦІЙНИХ ПРІОРИТЕТІВ МОДЕРНІЗАЦІЇ СИСТЕМ ПИТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ВОДОВІДВЕДЕННЯ.....	138
5.1. Математичне моделювання вартості життєвого циклу схеми оптимізації систем питного водопостачання та водовідведення	138
5.2. Критеріальна адаптація та оцінка інвестиційної зрілості інфраструктурних проєктів за міжнародними стандартами	142

5.3. Висновки до розділу 5.....	147
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	149
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	152
ДОДАТОК А. Список опублікованих праць за темою дисертації.....	176
ДОДАТОК Б:	182
Лист підтримки доктора технічних наук, професора Хоружого Віктора Петровича.....	182
Лист підтримки КП «Дніпроводоканал» ДМР.....	184
Акт про використання та практичне впровадження результатів роботи КП «Дніпроводоканал» ДМР.....	186
ДОДАТОК В:.....	188
ДОДАТОК В1. Аналіз ризиків для систем питного водопостачання та водовідведення міста Дніпро в умовах надзвичайних ситуацій та воєнного стану.....	188
ДОДАТОК В2. Додаткові заходи щодо підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення міста Дніпро з урахуванням цілей сталого розвитку.....	191
ДОДАТОК В3. Розробка матриці ризиків для систем питного водопостачання та водовідведення міста Дніпро.....	197
ДОДАТОК В4. СТРАТЕГІЯ підвищення стійкості систем централізованого водопостачання та водовідведення міста Дніпро на період до 2030 року.....	206
ДОДАТОК В5. План реалізації заходів Стратегії підвищення стійкості систем централізованого водопостачання та водовідведення міста Дніпро на період до 2030 року.....	210

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АСУ ТП – автоматизована система управління технологічним процесом

ВНС – водопровідна насосна станція

ВОС – водопровідна очисна станція

Г АВ – гранульоване активоване вугілля

ГДК – гранично допустимі концентрації

ГІС – геоінформаційні системи

ГМ – гідравлічне моделювання

ІСР – ієрархічна структура робіт

ККД – коефіцієнт корисної дії

КОС – каналізаційні очисні споруди

ОВД – оцінка впливу на довкілля

ПАВ – порошкове активоване вугілля

ПБВ – Плани безпечного водопостачання

ПНС – підвищувальна насосна станція

РЧВ – резервуар чистої води

СЕС – сонячна електростанція

УФ – ультрафіолетове (опромінення)

ХБРЯ – хімічне, біологічне, радіаційне та ядерне (забруднення)

ЧРП – частотно – регульований привід

ВІМ – інформаційне моделювання об’єктів інфраструктури

CAPEX – капітальні витрати

DMA – дискретний район обліку (зона вимірювання та локалізації в мережі)

EPANET – спеціалізоване програмне забезпечення для гідродинамічних розрахунків та моделювання мереж

EPS – квазідинамічне моделювання поведінки системи (з подовженим періодом)

GPS – Глобальна система позиціонування (паспортизація об’єктів)

INP – формат файлу експорту графа мережі для розрахункового ядра

LCC – вартість життєвого циклу

- NPV_{res} – адаптований чистий дисконтований дохід з урахуванням резильєнтності
- OPEX – експлуатаційні витрати
- QGIS – геоінформаційна система для просторового аналізу та створення «цифрових двійників»
- SCADA – диспетчерське управління та збір даних (автоматизована система)
- B – економічний ефект (вигода) від впровадження превентивних заходів підвищення стійкості
- BCR_{res} – модифікований коефіцієнт вигоди – витрат з урахуванням резильєнтності
- C – сумарні витрати за вартістю життєвого циклу елементів системи
- D – внутрішній діаметр трубопроводу водопровідної чи каналізаційної мережі
- H – вільний гідравлічний напір / тиск в мережі
- h_w – сумарні втрати напору по довжині та в місцевих опорах трубопроводів
- K_{res} – коефіцієнт підвищення стійкості (резильєнтності) системи
- L – довжина розрахункової ділянки водопровідної або каналізаційної мережі
- NPV_{res} – адаптований чистий дисконтований дохід з урахуванням чинника резильєнтності
- P – гідродинамічний тиск у системі
- $P(A)$ – ймовірність виникнення аварійної ситуації або реалізації небезпечної події (загрози)
- Q – витрата води / об'єм водовідведення за одиницю часу
- R – інтегральний рівень ризику порушення функціонування системи
- RI – інтегральний індекс ризику
- $R(S)$ – інтегральний індекс стійкості системи
- T – тривалість розрахункового періоду (життєвого циклу проєкту)
- $t_{відн}$ – час, необхідний для ліквідації аварії та відновлення штатного режиму роботи системи
- V – вразливість системи (або ступінь потенційних збитків) до впливу зовнішніх загроз
- v – швидкість руху рідини (води або стічних вод) у трубопроводі
- z – геодезична відмітка (висота) розташування вузла системи над рівнем моря

ВСТУП

Актуальність роботи. Забезпечення стійкості (резильєнтності) систем питного водопостачання та водовідведення є стратегічним пріоритетом національної безпеки та екологічної стабільності України в умовах воєнних руйнувань, дефіциту енергопостачання та кліматичних змін. Класичні інженерні підходи до оцінки стійкості орієнтовані на стаціонарні умови й не враховують ризиків каскадних відмов, кіберзагроз, людського фактора та необхідності миттєвої адаптації інфраструктури до кризових режимів.

Перехід до сучасного планування розвитку громад вимагає розроблення інноваційних схем оптимізації муніципальних систем, побудованих на інтеграції ПС-моделювання, багатокритеріального аналізу ризиків критичної інфраструктури та дворівневих моделей стійкості (поєднання централізованих і нецентралізованих рішень). Необхідність наукового обґрунтування технологічних сценаріїв модернізації, переходу на безпечніші безхлорні реагенти та оцінки вартості життєвого циклу інфраструктурних об'єктів відповідно до Директив ЄС та новітніх вимог зумовлює високу актуальність, теоретичне і практичне значення теми дисертації.

Розроблення комплексних багатокритеріальних моделей підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення є надзвичайно актуальною науковою задачею. Її вирішення дозволить здійснити перехід від реактивного усунення наслідків аварій до превентивного ризик – орієнтованого управління інфраструктурою, що відповідає Національним цілям сталого розвитку України та гарантує екологічну і санітарно – епідеміологічну безпеку територіальних громад.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась згідно з державними програмами: «Розробка науково – методичних рекомендацій із забезпечення належної якості очищення стічних вод і захисту водних ресурсів. Прикладні дослідження і розробки.», «Забезпечення споживачів якісною питною водою в умовах сучасних викликів. Прикладні дослідження і розробки.» і тісно пов'язана з планами держбюджетної

тематики Київського національного університету будівництва і архітектури, які виконувалися на замовлення Міністерства освіти і науки України (№ державної реєстрації 0122U200351, 0122U200386).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є наукове обґрунтування та розроблення методів і моделей підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення шляхом впровадження уніфікованих алгоритмів оптимізації, управління ризиками та адаптивних технологічних рішень для переходу від реактивного ліквідування аварій до превентивного ризик – орієнтованого управління.

Задачі дослідження:

- проаналізувати сучасний стан та виявити ключові загрози функціонуванню систем питного водопостачання та водовідведення в Україні, зокрема в умовах воєнного стану та зростаючих техногенних і хімічних, біологічних, радіаційних та ядерних ризиків;

- розробити логіко – математичну формалізацію задачі підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення, а також концептуальну модель вирішення проблеми підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення;

- розробити математичну модель оцінки та інтегральний індекс стійкості $R(S)$, що дозволить прогнозувати час відновлення та здатність системи до адаптації за різних сценаріїв впливу;

- розробити комплексну систему показників (індикаторів) для оцінки поточного стану систем питного водопостачання та водовідведення, що враховують експлуатаційні, енергетичні та безпекові аспекти в умовах екстремальних зовнішніх впливів;

- сформувати методологію побудови багатокритеріальної матриці ризиків, яка дозволяє ідентифікувати, класифікувати та ранжувати загрози критичній інфраструктурі за рівнем їхнього впливу на живучість системи;

- дослідити вибір адаптивних технологічних рішень для мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій;

- систематизувати й структурувати причинно – наслідкові зв'язки факторів впливу на стійкість систем питного водопостачання та водовідведення шляхом розроблення шестивекторної діаграми Ісікави для переходу від емпіричного переліку загроз до жорсткої ієрархії ризик – орієнтованого планування;

- на основі аналізу теоретичних та експериментальних досліджень розробити методи та алгоритми для верифікації математичної моделі та доведення ефективності запропонованих управлінських рішень.

Об'єкт досліджень – процес функціонування та планування розвитку систем питного водопостачання та водовідведення в умовах впливу кризових і деструктивних факторів (воєнних, техногенних та екологічних).

Предмет досліджень – методологічні засади, математичні моделі та інженерно – технологічні рішення щодо підвищення стійкості (резильєнтності) систем питного водопостачання та водовідведення через інструменти схем оптимізації.

Методи дослідження. Для досягнення поставленої мети та розв'язання визначених завдань у роботі використано комплекс наукових методів: системний аналіз, декомпозиція та узагальнення; логіко – математичне моделювання та математична оптимізація; метод ризик – орієнтованого планування; метод аналізу ієрархій (метод Сааті); гідравлічне моделювання та геопросторовий аналіз; нормативно – аналітичний метод, методи стратегічного планування та оптимізації; метод бенчмаркінгу.

Наукова новизна одержаних результатів:

- розроблено математичну модель оцінки та інтегральний індекс стійкості $R(S)$ систем питного водопостачання та водовідведення, що враховує взаємозв'язок параметрів та дозволяє кількісно оцінювати здатність системи зберігати критичні функції, адаптуватися до деструктивного впливу;

- розроблено комплексну систему індикаторних показників стійкості систем критичної інфраструктури, що охоплює показники технічного стану, ресурсозбереження, енергоефективності, технологічної захищеності, екологічної безпеки та готовності до роботи в умовах надзвичайних ситуацій;

- науково обґрунтовано оновлений методологічний підхід до створення схем оптимізації систем централізованого водопостачання та водовідведення як

інструменту стратегічної безпеки територіальних громад, який передбачає врахування критеріїв стійкості, ризиків, енергоефективності, гідравлічного моделювання, геопросторового аналізу та заходів функціонування систем у надзвичайних ситуаціях і воєнний час;

- на основі логіко – математичного методу побудовано трифакторну матрицю ризиків для систем питного водопостачання та водовідведення, у якій рівень ризику визначається з урахуванням стабільності функціонування об'єктів критичної інфраструктури;

- набув подальшого розвитку практичний інструментарій ризик – орієнтованого планування та управління стійкістю критичної інфраструктури, що передбачає формування адаптивних інженерно – технологічних рішень.

Практичне значення отриманих результатів. Практичне значення дисертаційної роботи полягає у створенні реальних інструментів та нормативної бази для сфери питного водопостачання та водовідведення України відповідно до сучасних викликів безпеки та функціонування в умовах воєнного стану.

Основні аспекти практичного впровадження одержаних результатів полягають у наступному:

1. Результати досліджень стали науковим та методологічним підґрунтям для розроблення Порядків. Ці документи вперше в Україні на законодавчому рівні зобов'язують органи місцевого самоврядування враховувати критерії стійкості та оцінку ризиків при плануванні розвитку інфраструктури.

2. Створено прикладну Матрицю ризиків та комплексну систему індикаторних показників стійкості. Цей інструментарій дозволяє керівникам підприємств питного водопостачання та водовідведення, а також представникам органів місцевого самоврядування самостійно проводити аудит вразливості систем та науково обґрунтовано пріоритизувати заходи для запобігання надзвичайним ситуаціям і загрозам.

3. За безпосередньої участі здобувача розроблено та впроваджено «Стратегію підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення м. Дніпро на період до 2030 року». Практична реалізація стратегії дозволила:

- створити цифрову гідравлічну модель мережі для точного прогнозування сценаріїв аварійних відключень та падіння тиску;
- обґрунтувати перехід об'єктів критичної інфраструктури на автономні джерела живлення, зокрема масштабне застосування енергоефективних «насосів блекауту»;
- впровадити план поетапної відмови від використання небезпечного газоподібного хлору на користь безпечних електрохімічних методів знезараження.

4. Практично доведено технологічну ефективність застосування мобільних та локальних установок доочищення води. Використання таких модулів із системами дозування порошкового активованого вугілля як універсального сорбційного бар'єра забезпечує гарантовану якість питної води для критичних об'єктів соціальної сфери навіть у випадку каскадного виходу з ладу основних централізованих споруд.

5. Запропоновані методи оптимізації та використання бенчмаркінгу дозволяють зменшити операційні витрати підприємств питного водопостачання та водовідведення на 15–20% за рахунок раціонального енергоспоживання та зменшення втрат води. Це вивільняє ресурси для подальшого посилення стійкості систем.

6. Результати роботи можуть бути використані центральними органами виконавчої влади, місцевими державними адміністраціями, органами місцевого самоврядування, проєктними організаціями та підприємствами питного водопостачання та водовідведення. Інструментарій адаптований для використання під час розробки схем оптимізації, планів стійкості та відновлення населених пунктів, а також місцевих містобудівних програм, генеральних планів забудови, іншої містобудівної документації, схем і правил.

Особистий внесок здобувача. Критичний аналіз стану проблеми і вибір напрямку досліджень повністю виконаний здобувачем і погоджений з науковим керівником. Основні результати дисертаційної роботи, їх узагальнення, обробка та аналіз отриманих результатів виконані безпосередньо автором.

Апробація результатів дисертації. Основні положення, наукові результати теоретичних та експериментальних досліджень за напрямком дисертації були апробовані та представлені на 4 міжнародних конференціях, а саме:

1) Міжнародна науково–практична конференція «Екологія. Ресурси. Енергія. Багатофункціональні еко- та енергоефективні, ресурсозберігаючі технології в архітектурі, будівництві та суміжних галузях», Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, 23-25 листопада 2022 року.

2) V Міжнародна науково–практична конференція «Енергоощадні машини і технології» (секція №2 «Інноваційні технології відновлення інфраструктури в Україні»), Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, 22-24 травня 2024 року.

3) V Міжнародна науково–практична конференція «Енергія. Ресурси. Екологія. Багатофункціональні еко- та енергоефективні, ресурсозберігаючі технології в архітектурі, будівництві та суміжних галузях», Київський національний університет будівництва і архітектури, м. Київ, 27-29 листопада 2024 року.

4) I Міжнародна науково–практична конференція «Advanced Technologies in Scientific Research», International Scientific Unity, Rotterdam, Netherlands. August 20-22, 2025.

5) В рамках заходів Всеукраїнського об'єднання організацій роботодавців «Федерація роботодавців комунальної інфраструктури, енергетики та житлово-комунального господарства України» С. Потапенко 27 лютого 2025 року проведено семінар на тему: «Світовий досвід та нові науково-методичні підходи до оптимізації систем питного водопостачання та водовідведення (нові підходи в законодавстві)» для профільних підприємств, органів місцевого самоврядування, інших зацікавлених сторін.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 15 друкованих працях, серед яких: 10 статей у наукових фахових виданнях України та іноземних журналах (з них 2 статті у виданнях, що індексуються наукометричними базами Scopus / Web of Science, 8 статей у фахових виданнях категорії «Б»), 1 стаття у виробничо – практичному журналі з водопостачання та водовідведення, а також 4 тези доповідей у збірниках матеріалів науково–практичних конференцій та 1 проведений особисто здобувачем семінар.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації,

вступу, п'ятьох розділів, висновків і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 226 сторінок, з них: 148 сторінок основного тексту, список використаних джерел із 197 найменувань на 24 сторінках; 3 додатка на 50 сторінках. Робота містить 32 формули, 26 таблиць, 19 рисунків.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ СИСТЕМ ПИТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ВОДОВІДВЕДЕННЯ

1.1. Світовий та вітчизняний досвід управління системами питного водопостачання та водовідведення

Питне водопостачання та водовідведення є основними елементами соціального та економічного розвитку країни. Забезпечення доступу до якісної питної води та ефективне управління водними ресурсами сприяє покращенню життєвих умов населення, розвитку економіки та соціальних сфер. Згідно з цілями сталого розвитку до 2030 року в Україні заплановано: забезпечення доступності та сталого управління водними ресурсами та санітарією; забезпечення доступу до недорогих, надійних, стійких і сучасних джерел енергії для всіх; створення стійкої інфраструктури; забезпечення відкритості, безпеки, життєстійкості й екологічної стійкості міст, інших населених пунктів; забезпечення переходу до раціональних моделей споживання і виробництва тощо [74].

Всесвітня організація охорони здоров'я (далі – ВООЗ) рекомендує впровадження планів безпечного водопостачання (далі – ПБВ) для зменшення ризиків, пов'язаних із якістю питної води. У країнах Європейського Союзу (далі – ЄС) цей підхід включено до національного законодавства [129, 182, 190].

Слід зазначити, що санітарія включає сукупність практичних заходів, спрямованих на оздоровлення оточення людини, у тому числі передбачає заходи з відведення стічних вод з територій промислових, жилих будівель (квартири, приватного будинку) за допомогою інженерних санітарно – технічних приладів та каналізаційної мережі.

За даними глобальних звітів ВООЗ у 2023 році розвинені країни Європи, Північної Америки, Австралії мають практично повне покриття безпечною питною водою, модернізовані системи питного водопостачання та водовідведення, використовують енергоефективні технології очищення.

Країни з середнім рівнем доходів (країни Азії, Латинської Америки) мають проблеми із забезпеченням доступу до безпечної питної води населення в сільській

місцевості, часткове оновлення інфраструктури, але з нерівномірним розподілом і зростанням інвестицій у міські системи водовідведення.

У країнах з низьким рівнем доходів (країнах Африки на південь від Сахари, частково Південній Азії) значна частина населення покладається на небезпечні джерела води (відкриті водойми, колодязі). В цих країнах відсутні централізовані системи водопостачання та водовідведення і низький рівень фінансування та технічної підтримки сфери питного водопостачання та водовідведення [137, 168, 197].

Глобальний аналіз по країнах світу показує, що у період з 2000 року по 2020 рік доступ населення до безпечної води зріс із 78% до 90%, а доступ до санітарії – з 54% до 74%. Цій позитивній динаміці сприяє фактичне впровадження затверджених ПБВ і законодавчих документів щодо санітарії в різних країнах світу [168, 175, 197].

Так, майже всі розвинені країни Європи, Північної Америки, Австралії мають затверджені національні або регіональні ПБВ. У країнах Європи ПБВ є обов'язковими для всіх країн – членів. У США ПБВ інтегровані в систему оцінки ризиків для систем питного водопостачання. В Європі діє законодавство щодо очищення міських стічних вод, стандартизація методів очищення стічних вод та поводження з відходами.

У країнах з середнім рівнем доходу прогрес у впровадженні ПБВ спостерігається, але залишається нерівномірним. Наприклад, у Бразилії, Індії, Китаї активно розробляються та впроваджуються ПБВ для міських систем питного водопостачання, проте у сільській місцевості їх реалізація обмежена. В країнах Латинської Америки (наприклад, у Мексиці та Перу) прийнято національні програми з модернізації систем водовідведення. У Південній Азії, зокрема в Індії законодавство у вигляді затверджених програм стимулює будівництво туалетів і модернізацію інфраструктури.

У країнах з низьким рівнем доходу лише 20–30% країн мають національні або регіональні ПБВ. Наприклад, у Кенії діють пілотні програми впровадження ПБВ у великих містах. У Малаві та Замбії лише окремі громади впроваджують базові інструменти для безпеки води. Багато країн ще не мають чітких законодавчих рамок. Зусилля зосереджуються на національних стратегіях, які підтримуються міжнародними організаціями, такими як ЮНІСЕФ чи ВООЗ. Затверджені програми з

питань санітарії, у тому числі щодо водовідведення, успішно працюють в ряді африканських країн, включаючи Ефіопію та Сьєрра-Леоне [173, 174].

За даними глобальних звітів ВООЗ у 2023 році 93 країни світу включили ПБВ до національної політики та стратегій, 129 країн мали національні стратегії в галузі санітарії, але їх практична реалізація залишається проблемою, особливо у країнах із низьким доходом [137, 176].

Оптимізація систем питного водопостачання та водовідведення є ключовим напрямом для забезпечення стійкого розвитку у багатьох країнах світу. Загалом, це довгострокове перспективне планування заходів з розвитку та стійкості систем питного водопостачання та водовідведення, що сформовано за результатами комплексного аналізу існуючих і очікуваних об'єктів. Розглянемо узагальнений аналіз методів, які використовуються в різних країнах.

У США значну увагу приділяють модернізації інфраструктури, зокрема, заміні старих трубопроводів для зменшення витоків, а також впровадженню енергоефективного обладнання та моніторингових систем. За оцінками, такі заходи можуть суттєво знизити енергоспоживання та витрати на обслуговування [29, 128, 193].

У США, країнах Європи, таких як Німеччина та Нідерланди, активно використовуються технології інтелектуального управління для виявлення витоків і оптимізації систем питного водопостачання [126, 147].

У Австралії розроблено масштабні програми з повторного використання очищених стоків для промислових і сільськогосподарських потреб, що дозволяє економити прісноводні ресурси [12, 110].

Сінгапур інвестував у систему «NEWater», яка перетворює очищені стоки у воду для промислових та, навіть, побутових потреб, забезпечуючи стійкість систем питного водопостачання в умовах обмежених ресурсів [59].

Країни з низьким рівнем доходу, такі як Індія та Кенія, використовують недорогі децентралізовані системи очищення води, що дозволяє обслуговувати віддалені регіони без значних витрат [112, 154].

У США законодавчі ініціативи, як-от закони про безпечну питну воду і про водну

інфраструктуру Америки, сприяють фінансуванню проектів питного водопостачання і водовідведення, зокрема заміни свинцевих труб [169].

Європейський Союз фінансує екологічно стійкі проекти через фонди розвитку, підтримуючи країни Східної Європи у впровадженні сучасних систем водовідведення [58, 131, 192].

Оптимізація систем питного водопостачання та водовідведення є комплексним процесом, що включає технологічні інновації, управлінські рішення та політичну підтримку. Різні країни адаптують ці підходи до своїх умов, забезпечуючи як доступність питної води, так і її ефективне використання. Ці дії сприяють досягненню глобальних цілей сталого розвитку, включаючи забезпечення доступу до чистої води та санітарії.

Досвід різних країн підкреслює важливість розробки ПБВ як основного механізму для управління ризиками в системах питного водопостачання під час криз.

В умовах постійної нестачі води Ізраїль впровадив ПБВ на національному рівні, інтегрувавши інноваційні технології з опріснення морської води та повторного використання стічних вод. Це дозволило забезпечити сталий доступ до води навіть у періоди загострення військових конфліктів [136, 181, 195].

У періоди посух австралійські міста розробили ПБВ, які включають заходи збереження, збирання дощової води та залучення приватних інвестицій у водний сектор.

Для захисту своїх водних ресурсів Південна Корея інтегрувала ПБВ у національну політику, акцентуючи увагу на запобіганні забрудненню річок і збереженні природних водних екосистем [140, 179].

Питне водопостачання в умовах конфліктів вимагає впровадження ПБВ та співпраці з міжнародними партнерами. Досвід країн, які успішно впровадили ПБВ, демонструє, що стратегічне управління може забезпечити стійкість систем питного водопостачання та водовідведення навіть у кризові часи.

У наведених прикладах більшість заходів оптимізації систем питного водопостачання та водовідведення були частиною національних стратегій, ПБВ або державних програм. Нижче описано, як ці країни закріплювали свої заходи у

відповідних документах.

У Сінгапурі було прийнято Національну водну стратегію. Документ передбачає чотири основні джерела води для країни: місцеві водні ресурси, імпортовану воду, NEWater (перероблену воду) та опріснену воду. Водна політика впроваджена через Агенцію, яка розробляє регламенти для управління водними ресурсами, включаючи моніторинг втрат води та управління попитом. Заходи, як-от NEWater і зменшення витоків у мережі, інтегровані у ПБВ [59, 176].

В Нідерландах також основним державним документом, що визначає довгострокові цілі водного управління, є Національна водна стратегія. Виконання європейських директив із забезпечення якісного очищення стічних вод впроваджується через Плани управління стічними водами.

У Ізраїлі прийнятий Закон про водні ресурси, який регулює всі аспекти використання води, від її видобутку до повторного використання. Національний водний план встановлює основи управління водними ресурсами, включаючи опріснення та повторне використання стічних вод [136, 195].

В Японії прийняті: Акт про водопостачання, який забезпечує стандарти якості питної води та управління водопровідними системами, і Акт про управління каналізацією, що регламентує експлуатацію та модернізацію систем водовідведення.

В Австралії ПБВ включають збирання дощової води, впровадження інтелектуальних лічильників і повторне використання води [12, 110].

Франція є прикладом країни, яка успішно модернізувала системи питного водопостачання та водовідведення завдяки чітким правовим нормам, технологічним інноваціям і ефективному управлінню. У Франції значну частину систем питного водопостачання та водовідведення передано в оренду приватним компаніям, наприклад, Veolia і Suez. Це дозволило залучити значні інвестиції в оновлення інфраструктури. Приватні оператори працюють за контрактами з муніципалітетами, які жорстко регламентують якість послуг, вартість і прозорість управління. Завдяки використанню інтелектуальних технологій вдалося знизити втрати води в мережах до рівня 20%, що є одним із найнижчих показників у Європі. У містах країни впроваджено автоматичні системи моніторингу витоків, які дозволяють оперативно

виявляти та усувати пошкодження. Франція суворо дотримується європейських директив щодо якості питної води. В країні впроваджені сучасні технології очищення, такі як ультрафільтрація, зворотний осмос і використання активованого вугілля. Постійний моніторинг якості здійснюється на різних етапах: від джерела водозабору до крана споживача. Франція впровадила систему повторного використання очищених стічних вод для технічних і сільськогосподарських потреб. Завдяки модернізації очисних споруд у країні значно скоротилося забруднення річок і озер, що було проблемою в середині XX століття. А сучасні очисні станції використовують біогаз, який отримують у процесі очищення стічних вод. Це дозволяє покривати до 50% енергетичних потреб таких станцій. Ухвалений у 2006 році Закон про воду та водні середовища визначає основи управління водними ресурсами у Франції. Він передбачає впровадження інновацій у системах питного водопостачання, фінансову прозорість і стаке використання водних ресурсів. Національний план управління водними ресурсами включає заходи з адаптації до змін клімату, які впливають на питне водопостачання та водовідведення, зокрема збереження водних екосистем і раціональне управління ресурсами. Франція активно виконує вимоги ЄС, включаючи ПБВ, оптимізацію водокористування та моніторинг якості води. Як результат, країна має стабільно високий рівень задоволеності послугами питного водопостачання та водовідведення серед населення, значне скорочення втрат води та зменшення витрат на обслуговування мереж [179]. Тобто, Франція досягла успіху завдяки поєднанню приватного управління, інноваційних технологій і державного регулювання. Вона стала одним із європейських лідерів у забезпеченні сталого водокористування, демонструючи, що оптимізація систем питного водопостачання та водовідведення може бути ефективною навіть у великих і густонаселених країнах.

Слід звернути увагу на той факт, що проблеми питного водопостачання в регіонах, які постраждали від збройних конфліктів, стають надзвичайно гострими. Бойові дії часто руйнують інфраструктуру, що забезпечує доступ до питної води. Наприклад, у Сирії під час конфлікту у 2016 – 2017 роках спостерігалось різке зменшення доступу до питної води: якщо до війни понад 90% домогосподарств використовували централізоване водопостачання, то у 2016 році цей показник впав

до 22%, а в 2017 – до 15,3%.

У Секторі Газа під час ізраїльських військових операцій пошкодження очисних споруд призвело до витоку неочищених стоків, що забруднило довколишні водні ресурси. В Лівані у 2006 році під час війни руйнування каналізаційних мереж призвело до значних екологічних проблем через скидання мулу в Середземне море. У Сьєрра-Леоне у 1990-х роках масові переміщення населення вплинули на структуру водоспоживання та спричинили нерівномірний розподіл водних ресурсів. В Афганістані, де війна триває десятиліттями, поширеною практикою стало використання колодязів, викопаних місцевими громадами, що забезпечує мінімальну доступність води у важкодоступних районах [180].

Під час конфліктів часто виникає потреба у децентралізованих системах, які залучають місцеві громади або приватних підприємців для забезпечення послуг питного водопостачання [112, 123, 124]. Науковці зазначають, що заходи щодо забезпечення фінансової стійкості водоканалів під час конфліктів повинні бути впроваджені завчасно. Досвід Кот-д'Івуару показує, що розподіл податків на місцевий рівень (фіскальна децентралізація) може забезпечити стійкість водопостачання навіть у періоди кризи. В Уганді була впроваджена державна програма залучення приватного сектору до управління водними ресурсами, що дозволило швидко відновити інфраструктуру [181].

Загалом питне водопостачання в умовах конфліктів вимагає комплексного підходу, що включає децентралізацію, співпрацю між різними суб'єктами та забезпечення фінансової підтримки для відновлення довіри споживачів. Досвід країн Близького Сходу, Африки та Азії підкреслює важливість адаптації інфраструктури до умов кризи та залучення міжнародних організацій до відновлення [174, 181].

Світові приклади показують, що успішна оптимізація систем питного водопостачання та водовідведення можлива лише за умови інтеграції заходів у національні стратегії та правові документи. Це забезпечує координацію між урядовими органами, приватним сектором і громадою. Ключові досягнення країн у галузі оптимізації систем питного водопостачання та водовідведення базуються на: модернізації інфраструктури; застосуванні ПБВ; повторному використанні водних

ресурсів; інтеграції інтелектуальних технологій для моніторингу та управління. Для глобального прогресу потрібна комплексна міжнародна співпраця, активне фінансування та впровадження сучасних технологій. Україні важливо інтегрувати найкращі практики для досягнення Цілей сталого розвитку та забезпечення населення якісною водою.

Для системного аналізу та зіставлення міжнародних моделей функціонування, забезпечення живучості та адаптивності систем питного водопостачання та водовідведення доцільно систематизувати світовий досвід у вигляді матриці ризик – орієнтованого управління (Таблиця 1.1.1).

Таблиця 1.1.1

Матриця глобальних моделей управління та забезпечення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення з урахуванням вимог ВООЗ та ЄС

Країна / Регіон	Базовий регуляторний документ / Інструмент	Ключові технологічні та управлінські заходи	Технологічний ефект для стійкості системи
Франція	Закон про воду та водні середовища, модель довгострокової оренди (Veolia, Suez)	Інтелектуальні технології моніторингу витоків, автоматизоване управління та виявлення пошкоджень	Зниження втрат води в мережах до середнього рівня 20% (один з найнижчих показників в ЄС)
Сінгапур	National Water Strategy («Чотири національні крани»), впровадження ПБВ	Диверсифікація джерел, масштабне впровадження передової технології регенерації «NEWater»	Глибока переробка та повторне використання очищених зворотних вод для промислових потреб
Ізраїль	Закон про водні ресурси, Національний комплексний водний план	Інтеграція інноваційних технологій масштабного опріснення та повторного використання стічних вод	Гарантування сталого доступу до ресурсу в умовах хронічного дефіциту та військових ескалацій
Регіони криз та конфліктів (Сирія, Газа, Ліван)	Національні гуманітарні стратегії за підтримки UNICEF та ВООЗ	Фіскальна децентралізація, використання мобільних станцій та децентралізованих свердловин	Компенсація падіння охоплення централізованим водопостачанням у кризових умовах

Аналіз наведених світових моделей свідчить, що спільним знаменником для технологічно розвинених країн є безальтернативний перехід від ліквідації наслідків аварій до превентивного ризик – орієнтованого планування.

Фундаментальні дослідження у сфері розроблення Планів безпеки води, інтегрованого управління водними ресурсами, оптимізації схем очищення та повторного використання стічних вод і утилізації їхніх осадів відображені у працях таких іноземних науковців та фахівців міжнародних організацій: J. Bartram, A. Davison [114], P. S. F. Barbosa [113], A. Agathokleous, S. Christodoulou [108], D. Ahmed, I. N. Bajwa [109], S. G. J. Heijman [139], R. M. Hozalski, E. J. Bouwer [141], A. Matilainen, M. Sillanpää [155, 157], R. M. Harrison [118], P. Vineis [160], J. Nriagu [138], R. J. Bull [117], B. Chen, P. Westerhoff [119], M. Chemil [120], Y. Choi [122], J. Cole, N. Grigg [123], M. B. Hamoda [124], K. Diao [125], L. G. Ribeiro, M. C. Almeida [126], S. Maryati [154], A. Matos [156], S. Kumar, R. Naidoo [142], J. Zhang [144], M. Gallagher, H. Rogers [145], A. Kibaroglu [149], R. A. Francis [133], G. Hutton [143], D. Geleta Ebsa [134], A. Babu Ghimire [112], D. G. Yoo [188], B. Yang [189], P. Szefer та K. Thomson [127].

Водночас вітчизняний досвід управління системами питного водопостачання та водовідведення історично формувався на засадах високого рівня централізації. Сьогодні експлуатація цих систем в Україні ускладнюється не лише критичною зношеністю основних фондів і високою енергоємністю, але й безпрецедентними викликами воєнного часу. Загрози цілеспрямованих руйнувань, тривалих блекаутів та потенційного хімічного, біологічного, радіаційного і ядерного (далі – ХБРЯ) забруднення довели, що класичні підходи до забезпечення лише гідравлічної надійності є недостатніми. Виникла нагальна потреба у впровадженні концепції комплексної стійкості (резильєнтності) систем.

Фундаментальний науково – методичний базис для вирішення проблем функціонування, надійності та оптимізації систем питного водопостачання та водовідведення сформовано потужними вітчизняними науковими школами. Класичні засади проєктування та розрахунку надійності водопровідних мереж були закладені в фундаментальних працях видатних вчених – корифеїв Київського національного

університету будівництва і архітектури (далі – КНУБА), зокрема д.т.н., проф. А. М. Тугая та інших дослідників. Його наукова школа сформувала класичну теоретичну базу для розрахунку підземних водозаборів, оптимізації їхньої експлуатації та забезпечення базової гідравлічної надійності систем водопостачання. Дослідження д.т.н., проф. А. М. Тугая залишаються основоположними для сучасного математичного моделювання процесів транспортування води та проектування технологічно стійких водозабірних вузлів.

Різні аспекти функціонування, модернізації та забезпечення експлуатаційної надійності систем питного водопостачання та водовідведення, а також екологічної безпеки водних об'єктів досліджували провідні вітчизняні вчені: О. М. Андрєєв, М. М. Корнєєв, І. В. Ковальчук [1], С. Л. Василенко, В. М. Волков [4], В. В. Гончарук [9], О. В. Кравченко [36–42], В. П. Хоружий [38, 42, 49, 93–95, 100], Т. П. Хомутецька [44, 45, 47, 48, 96–100], В. І. Каніболоцький [42], В. М. Макаренко [47–49, 121], С. Ю. Мартинов [51, 115, 152, 153], А. К. Кучерова [51, 115], С. Е. Зелінський [27], С. Карелін [30], С. М. Клімов [51], Є. М. Марцелюк, Д. В. Чарний [52], О. М. Горбань, В. Є. Бахрушин [10], Ю. Б. Бродський [3], П. М. Павленко [63], О. Матвієнко [53], В. М. Ніколайчук, О. В. Шилюк [55], В. В. Яковлєв [104, 105], а також Д. Новицький [56, 57]. Внесок у розроблення методологій щодо управління ризиками на об'єктах водопостачання та водовідведення внесла І. В. Уряднікова [86–95, 150, 177].

Питаннями екологічної безпеки водойм, гідрологічного режиму та моніторингу водних ресурсів в умовах кліматичних змін активно займається М. В. Яцюк [163, 184–187]. Проблеми руйнування великих гідротехнічних споруд, Каховського водосховища та оцінки якості води в річкових басейнах висвітлено у працях В. Дупляка, С. Величка, О. Дупляка [17], Ю. Ю. Дмитрука [79], А. Чугая [102], О. П. Тарасюка та О. І. Циганенка [177].

Водночас вагомий внесок у дослідження надійності, ресурсозбереження та технологій підготовки питної води зробила наукова школа Національного університету водного господарства та природокористування (НУВГП, м. Рівне). Фундаментальні праці П. Д. Хоружого, М. М. Гіроля, В. О. Орлова та їхніх колег дозволили розробити прогресивні методики оптимізації процесів очищення

природних вод та підвищення технологічної стійкості мереж з урахуванням регіональних особливостей вододжерел.

Значний теоретичний і практичний доробок у сфері водовідведення та очищення стічних вод в умовах високих антропогенних навантажень належить вченим Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова на чолі зі С. М. Епоєм. Їхні дослідження спрямовані на енергозбереження та оптимізацію роботи очисних споруд, що є критично важливим для стабілізації екологічної ситуації в індустріальних регіонах.

Питання екологічної безпеки та впровадження передових фізико – хімічних методів водоочищення глибоко розроблені науковцями КПІ ім. Ігоря Сікорського, зокрема школою М. Д. Гомелі, чий дослідження у сфері сорбційних технологій дозволяють суттєво підвищити бар'єрні функції водоочисних станцій. Також важливі дослідження з гідравліки водних мереж та захисту довкілля проводяться вченими Національного університету «Львівська політехніка» (В. В. Чернюк, М. С. Мальований).

Слід зазначити, що сьогодні проблематика стійкості муніципальних систем виходить за межі класичної гідравліки і активно перетинається з цифровізацією. Значний доробок у цьому напрямку належить науковцям з управління проєктами, міського будівництва та інформаційних технологій (спеціалістам із впровадження геоінформаційних систем (QGIS) та BIM – моделювання).

У їхніх дослідженнях стійкість розглядається через призму створення «цифрових двійників» інфраструктури. Це дозволяє просторово моделювати живучість мереж при руйнуваннях щільної міської забудови, прогнозувати каскадні відмови комунікацій та оптимізувати розподіл ресурсів під час ліквідації надзвичайних ситуацій. Інтеграція таких просторових ІТ – рішень з класичними гідравлічними алгоритмами формує найсучасніший підхід до інфраструктурного планування.

Трансформацію векторів вітчизняної наукової думки – від класичної оцінки надійності окремих інженерних споруд до сучасної парадигми комплексної стійкості (резильєнтності) критичної інфраструктури в умовах воєнних дій – відображено на структурно – логічній схемі (Рисунок 1.1.1).

Представлена структурно – логічна схема наочно демонструє, що пропонуване у дисертаційній роботі дослідження не є ізольованим, а виступає прямим і логічним продовженням фундаментальних напрацювань провідної наукової школи. Воно інтегрує існуючі технологічні, гідравлічні та ризикологічні підходи для вирішення нової наукової задачі – переходу від реактивного ліквідування наслідків аварій до превентивного управління стійкістю систем питного водопостачання та водовідведення в умовах каскадних криз.

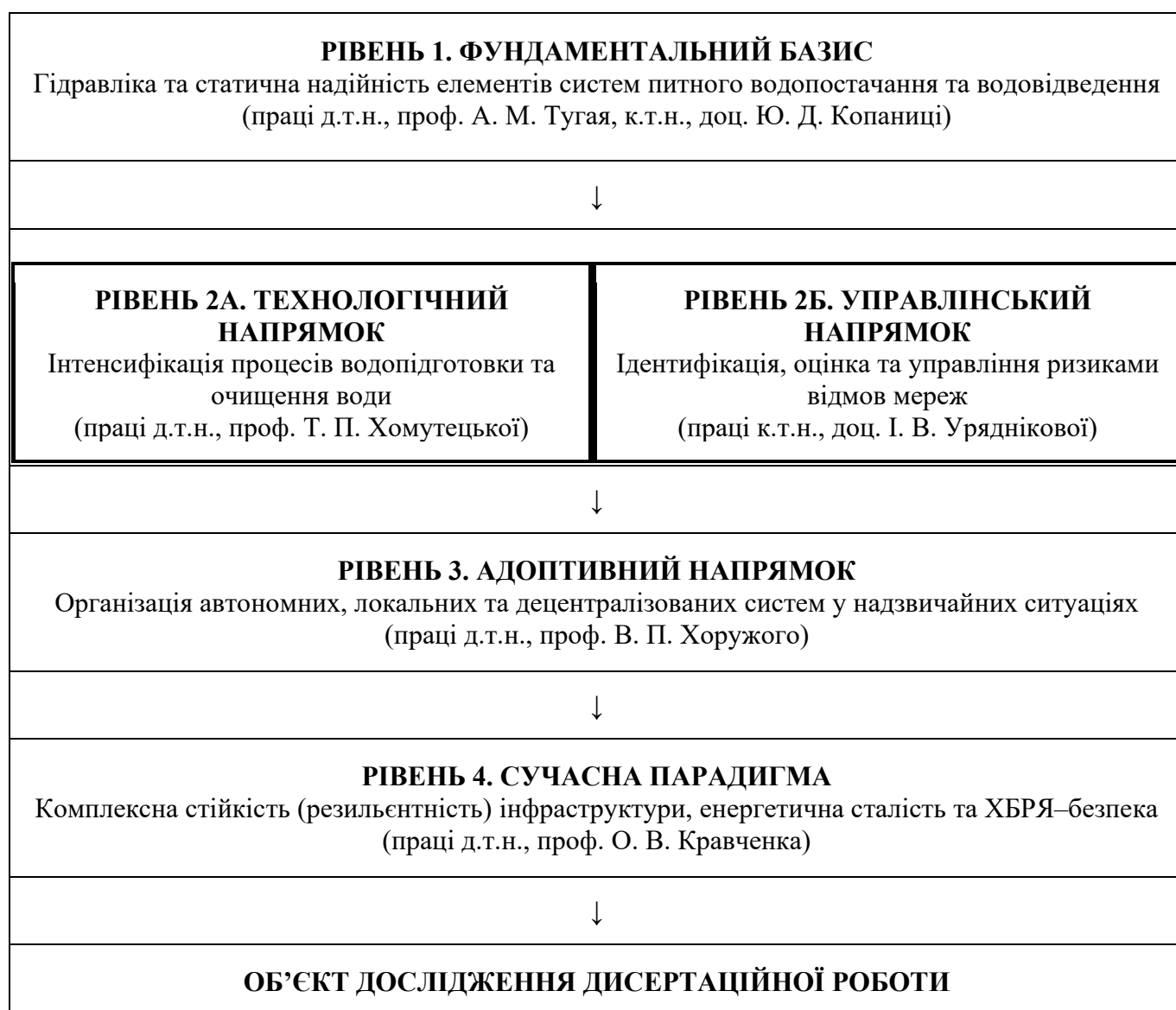


Рисунок 1.1.1. Структурно – логічна схема розвитку вітчизняних наукових підходів до забезпечення надійності та стійкості систем питного водопостачання та водовідведення

Попри глибокий і різнобічний доробок вітчизняних учених щодо забезпечення надійності та оптимізації роботи інфраструктури, виклики воєнного стану висвітлили недостатність існуючих методик для протидії каскадним аваріям та тотальним блекаутам. Це формує об'єктивну наукову необхідність розроблення нових комплексних алгоритмів та математичних моделей, що дозволять перейти від реагування на аварії до превентивного управління стійкістю систем питного водопостачання та водовідведення.

1.2. Аналіз нормативно – правової бази та системні проблеми інфраструктури України

Сучасний етап розвитку систем питного водопостачання та водовідведення України вимагає докорінної перебудови підходів до його реформування та управління. Забезпечення стійкості об'єктів критичної інфраструктури в умовах воєнного стану, системних енергетичних криз та постійної загрози техногенних і ХБРЯ – забруднень перебуває у прямій залежності від досконалості нормативно – правового регулювання та ефективності наявних інженерно – методичних інструментів [1; 3]. Проте детальний аналіз вітчизняного законодавчого поля та фактичного технічного стану галузі свідчить про наявність низки глибоких нормативних суперечностей та системних деструктивних чинників [5; 12].

В Україні деякі принципи ПБВ адаптовано в низці нормативних документів, що регламентують розроблення схем оптимізації систем централізованого водопостачання та водовідведення. Разом з тим, тривалий час базовим практичним інструментом у цій сфері слугували Методичні рекомендації з розроблення схем оптимізації роботи систем централізованого водопостачання та водовідведення, затверджені наказом Міністерства з питань житлово – комунального господарства України від 23 грудня 2010 р. № 476. На сьогодні зазначені Методичні рекомендації є морально та технологічно застарілими, вони не повною мірою враховують сучасний стан справ, воєнні ризики, новітні бар'єрні технології та можливості цифрового моделювання. Окрім того, вони не були зареєстровані в Міністерстві юстиції України, через що носили суто рекомендаційний характер і не мали належної юридичної сили

для обов'язкового виконання комунальними підприємствами країни.

Такий регуляторний вакуум призвів до того, що відомі методичні підходи у сфері питного водопостачання та водовідведення, проєктного аналізу та теорії прийняття управлінських рішень тривалий час розвивалися відокремлено. Вони не були інтегровані між собою у єдиний системний науково – методичний підхід, націлений на комплексне вирішення проблеми резильєнтності міської інфраструктури. Як наслідок, у вітчизняній практиці донедавна була відсутня уніфікована методологія та доступні практичні інструменти для отримання повної, об'єктивної та достовірної інформації про фактичний техніко – експлуатаційний стан систем питного водопостачання та водовідведення, а практика аналізу їхньої реальної оптимізації мала фрагментарний характер.

Слід зазначити, що системи питного водопостачання та водовідведення населених пунктів України мають свої специфічні особливості та вразливості, які необхідно обов'язково враховувати під час стратегічного планування та розроблення схем оптимізації. До найгостріших системних проблем інфраструктури належить наступне.

1. Гіперцентралізація та низька гнучкість.

Існуюча лінійно – вузлова архітектура мереж, орієнтована на великі магістральні водоводи та єдині потужні джерела, за умов фізичного руйнування або знеструмлення головних об'єктів призводить до миттєвого зневоднення великих селитебних зон [8].

2. Критична енергозалежність.

Насосні станції та очисні споруди характеризуються високою питомою енергоемністю, а відсутність автономних джерел живлення та застарілі гідравлічні режими роблять їх вразливими до системних блекаутів [5; 11].

3. Високий рівень фізичного та морального зносу.

Понад 40–50% магістральних трубопроводів та колекторів перебувають в аварійному стані, що зумовлює наднормативні втрати питної води та каскадні аварії [4; 6].

4. Технологічна незахищеність від нових типів загроз.

Традиційні схеми очисних споруд не розраховані на бар'єрну протидію залповим

ХБРЯ – контамінаціям, а тривале використання небезпечного газоподібного хлору для знезараження створює постійну загрозу виникнення локальних екологічних катастроф у зонах ведення бойових дій [1; 10].

Для системного розуміння глибини деструктивного взаємовпливу зазначених чинників на загальний рівень безпеки життєзабезпечення міст, автором структуровано виявлені вразливості інфраструктури у вигляді взаємопов'язаної схеми каскадних технічних ризиків (Рисунок 1.2.1).

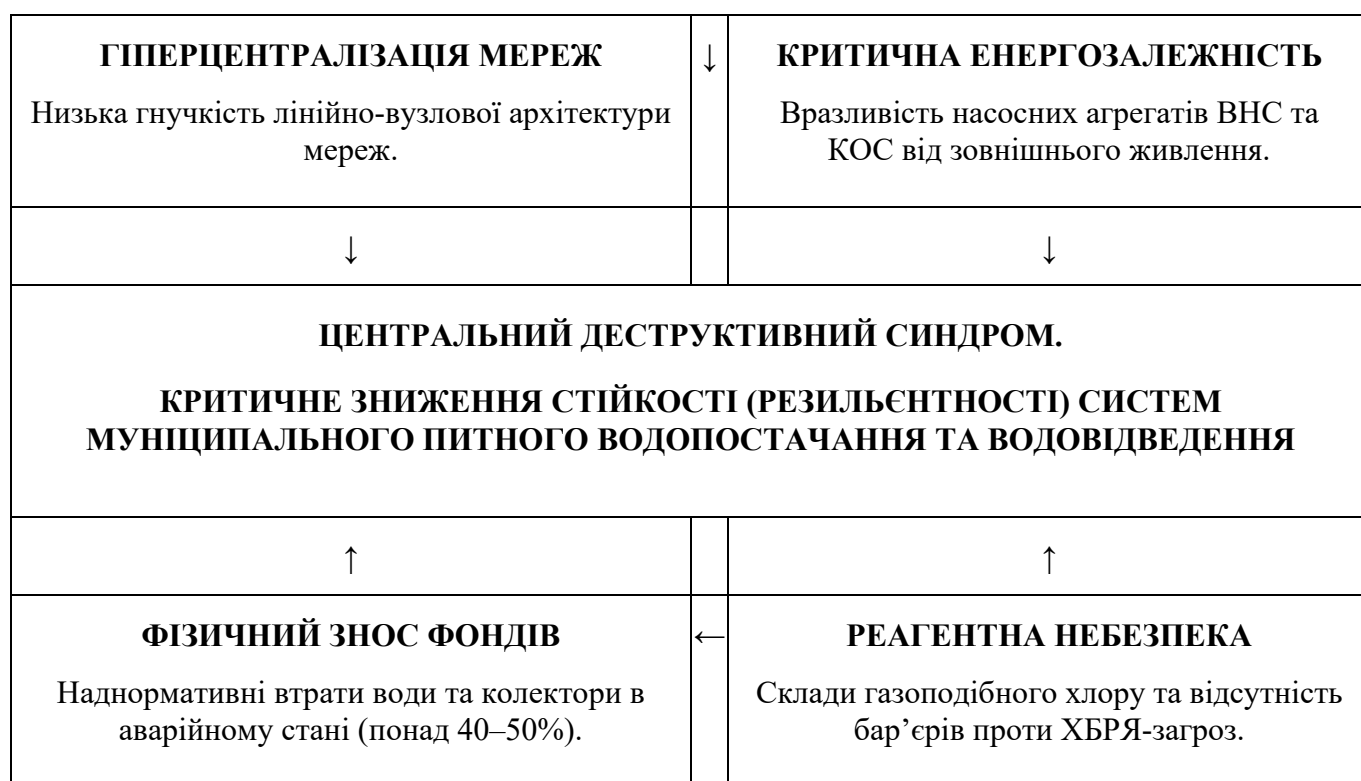


Рисунок 1.2.1. Структурна схема взаємозв'язку системних технологічних та безпекових вразливостей сфер питної води та питного водопостачання, водовідведення України

На практиці під час модернізації об'єктів сфери питного водопостачання та водовідведення досі використовуються методики оцінки техніко – економічної ефективності лише для окремо взятого, ізольованого інвестиційного проєкту. Водночас у галузі повністю відсутні науково обґрунтовані методичні підходи до формування оптимальної сукупності (портфеля) проєктів з питного водопостачання

та водовідведення з метою створення комплексної муніципальної програми (плану) [9]. Не впроваджуються інструменти аналізу взаємного впливу проєктів з погляду суміщених техніко – економічних показників, а також алгоритми чіткої пріоритетності вибору заходів в умовах жорстких фінансових обмежень та дефіциту місцевих бюджетів [11].

Для подолання цих системних деструктивних чинників та виконання вимог законів України «Про критичну інфраструктуру» [15], «Про водовідведення та очищення стічних вод» [16], «Про питну воду та питне водопостачання» [17] та Водної стратегії України на період до 2050 року, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 09 грудня 2022 р. № 1134-р [18], за участю автора було запропоновано нові системні науково – методичні підходи. Вони втілені у вигляді обов’язкових до виконання державних нормативних документів – Порядків.

Зазначені Порядки докорінно змінюють концептуальний вектор інфраструктурного планування.

Так, замість статичного фіксування поточних параметрів, вони вимагають розроблення динамічних комплексних рішень, спрямованих на довгострокову стійкість, енергоефективність та технологічну безпеку систем питного водопостачання та водовідведення.

Нова регуляторна парадигма інтегрує обов’язковий інструментарій ризик – менеджменту: аналіз вразливостей, розрахунок матриць ризиків, сценарне моделювання розвитку територіальних громад та розроблення прозорих планів, орієнтованих на залучення капіталу міжнародних фінансових організацій [12; 13].

Нормативним відображенням цього підходу є чітка структура затверджених Порядків, де Розділ II регламентує збір та всебічний аналіз вихідних даних щодо зносу і дефектів інфраструктури, Розділ III визначає математичні вимоги до гідравлічного моделювання і калібрування мереж у ГІС – середовищі, а Розділ IV безпосередньо зобов’язує громади формувати багатокритеріальні сценарії модернізації, заходи з енергоавтономності та інвестиційні плани. Відтак, розроблена схема оптимізації трансформується із суто інженерного опису в адаптивний інструмент превентивного управління безпекою життєдіяльності населених пунктів.

Для наочного відображення у Таблиці 1.2.1 наведено детальний компаративний аналіз застарілих підходів 2010 року та впроваджених нових науково – методичних підходів у вигляді державних Порядків 2025 року.

Таблиця 1.2.1

Порівняльна таблиця науково–методичних підходів у сферах питного водопостачання та водовідведення

Найменування порівняльних критеріїв та розділів	Недоліки існуючих Методичних рекомендацій (наказ Мінжитлокомунгоспу від 23.12.2010 № 476)	Переваги нових системних науково-методичних підходів у вигляді Порядків
Призначення, статус документа	Застарілі; мають неконкретизований зміст; не враховують сучасний стан справ, технології і можливості; не зареєстровані в Міністерстві юстиції України, носять рекомендаційний характер для підприємств.	Сучасні; враховують поточні і перспективні реалії сфери питної води та питного водопостачання, водовідведення, вимоги державних стратегій до 2030 та 2050 років; мають чіткі етапи розроблення, затвердження, моніторингу; зареєстровані в Мін'юсті; є обов'язковими до виконання.
Термінологія	Застосовані загальні терміни; потребують доповнень і деталізації; відсутні сучасні поняття.	Містять сучасні поняття, що спрощує аналіз і впровадження управлінських рішень.
Процедура розроблення схем оптимізації	Мають суто загальний опис; відсутні чіткі етапи розроблення та узгодження схеми оптимізації.	Включають покроково деталізовані етапи збору даних, аналізу, громадського обговорення та затвердження схем окремо для водопостачання та водовідведення.
Зміст та структура схем оптимізації	Мають узагальнені зміст і структуру без належної інженерної деталізації.	Мають нові конкретні, розширені зміст і структуру, які дозволяють повноцінно планувати, реалізовувати та здійснювати постійний моніторинг заходів розвитку.
Основні цілі	Не містять сучасних цілей розвитку, не інтегровані з вимогами існуючих та	Повністю враховують сучасні цілі сталого розвитку щодо забезпечення довгострокової надійності,

Найменування порівняльних критеріїв та розділів	Недоліки існуючих Методичних рекомендацій (наказ Мінжитлокомунгоспу від 23.12.2010 № 476)	Переваги нових системних науково-методичних підходів у вигляді Порядків
	перспективних національних стратегій і програм.	енергоефективності та гарантованої якості послуг.
Фокус на екологічних аспектах	Не враховують жорсткі вимоги сучасного вітчизняного та європейського екологічного законодавства.	Обов'язково включають заходи щодо здійснення стратегічної екологічної оцінки, мінімізації скидів забруднюючих речовин та раціонального водокористування.
Роль зацікавлених сторін	Повна відсутність чіткого розподілу ролей та відповідальності зацікавлених сторін.	Чітке розмежування функцій та юридичної відповідальності між Замовником (громадою) та Розробником схеми оптимізації.
Нормативно-правова база та посилання	Ґрунтуються на скасованих або глибоко застарілих нормативно-правових актах.	Повністю базуються на актуальному законодавчому полі України з урахуванням Директив ЄС та Закону «Про критичну інфраструктуру».
Рекомендовані технології	Не враховують сучасні технологічні методи, автоматизацію, сорбційні бар'єри та інновації.	Робиться жорсткий акцент на енергоефективності обладнання, новітніх методах очищення (ПАВ, УФ), інноваційних безхлорних технологіях знезараження.
Забезпечення стійкості систем у НС та у воєнний час	Повністю відсутнє.	Розроблені специфічні інженерні заходи, що підвищують живучість систем у кризових ситуаціях (автономна генерація, «насоси блекауту», резервні вузли).
Визначення індикаторних показників розвитку	Відсутнє.	Впроваджено систему чітких експлуатаційних, енергетичних та безпекових індикаторів, що дозволяють здійснювати моніторинг реалізації схеми.
Визначення оптимального сценарію	Відсутнє.	Обов'язкове включення альтернативних варіантів (базового, технологічного, адаптивного) для

Найменування порівняльних критеріїв та розділів	Недоліки існуючих Методичних рекомендацій (наказ Мінжитлокомунгоспу від 23.12.2010 № 476)	Переваги нових системних науково-методичних підходів у вигляді Порядків
		математичного обґрунтування найкращого сценарію.
Формування переліку і пріоритизація заходів	Відсутнє.	Чіткий алгоритм пріоритизації робіт на основі ієрархічної структури (ICP) за 1000-бальною шкалою, що групує ресурси для етапного виконання.
Оцінка вартості та порядок виконання робіт	Відсутнє.	Чітке довгострокове планування вартості (CAPEX / OPEX) та строків забезпечує високу реалістичність виконання інвестиційного плану.
Формування фінансової моделі	Відсутнє.	Інтеграція динамічних фінансових моделей на основі вартості життєвого циклу (LCC), що суттєво підвищує інвестиційну привабливість підприємств.
Гідравлічні розрахунки та просторовий аналіз	Відсутнє.	Використання сучасного комп'ютерного моделювання (QGIS, EPANET) є обов'язковим для точного виявлення «вузьких місць» та верифікації тисків у мережі.
Аналіз, оцінка та управління ризиками	Відсутнє.	Впровадження трифакторної матриці ризиків для управління безпекою, що гарантує загальну резильєнтність комунальних систем міста.
Отримання міжнародного фінансування	Відсутнє.	Наявність структурованих розділів за міжнародними стандартами (ОВД, індекси NPV_{res} , BCR_{res}) відкриває прямий доступ до кредитів та грантів МФО.

В основі запропонованих підходів до оптимізації лежать інтегровані методи управління водними ресурсами, які комплексно враховують взаємопов'язані технічні,

економічні, екологічні та соціальні аспекти [1, 2]. Згідно з новою регуляторною парадигмою [3], муніципальні схеми оптимізації більше не є статичними описовими документами; вони являють собою ітераційні інженерні проєкти, що обов'язково містять такі взаємозалежні етапи: повний аудит поточного стану системи, побудову та калібрування цифрових гідравлічних моделей [4], ризик – орієнтоване управління [5], багатокритеріальне сценарне моделювання та оцінку вартості життєвого циклу інфраструктурних елементів [6].

Впровадження у практику розроблення та реалізації цього науково – практичного підходу до оптимізації систем питного водопостачання та водовідведення дозволяє відмовитися від ізольованого проєктування окремих споруд [2, 7]. Забезпечується перехід до комплексного розгляду всього технологічного ланцюга – від джерела водозабору до скиду очищених зворотних вод – із застосуванням передових інженерних рішень та сучасних математичних методів підтримки прийняття управлінських рішень в умовах високого ступеня невизначеності [4, 8].

Таким чином, імплементація ПБВ та розроблення схем оптимізації систем централізованого водопостачання та водовідведення за новими вимогами державних Порядків є ключовим інструментом для досягнення Національних цілей сталого розвитку України [9]. Запропоновані у дисертаційній роботі методичні та інженерні заходи безпосередньо сприяють підвищенню надійності та безпеки надання послуг населенню, радикальному зменшенню антропогенного впливу на довкілля та створенню умов для масштабної енергетичної модернізації та підвищення стійкості підприємств комунального сектору країни [6, 10].

1.3. Огляд існуючих науково – методичних підходів до оцінки стійкості систем

Аналіз сучасного стану систем питного водопостачання та водовідведення в Україні свідчить про наявність глибоких системних проблем, які перешкоджають забезпеченню їхньої стійкості в умовах воєнного стану та зростаючих техногенних загроз [1]. Традиційні підходи до проєктування та експлуатації, що базувалися на

принципах статичної надійності, виявилися недостатніми для протидії каскадним аваріям та цілеспрямованому руйнуванню інфраструктури.

Для розроблення ефективного математичного та модельного апарату оптимізації систем питного водопостачання та водовідведення необхідно чітко класифікувати існуючі науково – методичні підходи, визначити їхні обмеження та межі застосування. У сучасній світовій та вітчизняній науковій думці еволюція методів оцінки інженерних систем пройшла шлях від класичної теорії надійності [2] до ризик – орієнтованого аналізу [3] та комплексної концепції резильєнтності (стійкості) [4].

Класичним підходом, орієнтованим на ймовірність безвідмовної роботи окремих елементів (трубопроводів, насосних агрегатів, запірно – регулюючої арматури), є концепція надійності. Вона базується на розрахунках інтенсивності відмов, середнього часу між поломками та коефіцієнтів готовності. Проте цей підхід має суттєвий недолік – він розглядає систему у статичному стані та не враховує динаміку і швидкість відновлення функцій об'єкта після катастрофічних зовнішніх впливів екстремальної амплітуди.

Сучасним підходом, що фокусується на здатності інженерного комплексу абсорбувати зовнішні загрози, адаптуватися до нових умов та максимально швидко відновлювати базові функції, є концепція стійкості (резильєнтності) [4, 5]. Паралельно розвивається методологія ризик – орієнтованого планування, яка базується на ідентифікації загроз через трифакторні матриці ризиків (ймовірність, вразливість, масштаб наслідків) та визначенні рівнів інфраструктурної захищеності.

Зіставлення цих парадигм доводить, що інтеграція ризик – орієнтованого аналізу та динамічної резильєнтності дозволяє змінити фокус оцінювання систем питного водопостачання та водовідведення з ізольованого розрахунку технічних відмов на комплексне моделювання стійкості всієї системи [5]. Особливого значення набуває дослідження поведінки інфраструктури в часі, де траєкторія деградації та швидкість відновлення параметрів вільного напорі і якості очищення безпосередньо залежать від гнучкості її топологічної структури [7]. Відтак, виникає потреба у створенні уніфікованого математичного апарату, здатного трансформувати якісні параметри виявлених деструктивних чинників у кількісні індикатори стійкості для оптимізації

планів громад.

Для детального порівняння та глибокого аналізу цих фундаментальних наукових парадигм автором сформовано компаративну матрицю науково – методичних підходів (Таблиця 1.3.1).

Таблиця 1.3.1

Компаративний аналіз фундаментальних науково – методичних підходів до оцінки систем питного водопостачання та водовідведення

Критерій порівняння	Концепція статичної надійності	Ризик-орієнтоване планування	Концепція динамічної стійкості (резильєнтності)
Основний фокус оцінки	Безвідмовність окремих елементів та вузлів мережі.	Ідентифікація загроз, оцінка ймовірностей та втрат.	Здатність системи відновлювати функції після негативного впливу.
Характер розрахунків	Статичний, імовірнісний (на основі ретроспективних відмов).	Сценарний, оціночний (на основі матриць ризиків).	Динамічний, часовий (моделювання траєкторії відновлення).
Реакція на екстремальні події	Не передбачає розрахунку каскадних руйнувань.	Оцінює потенційні збитки без урахування гнучкості системи.	Враховує адаптивну ємність, автономію та загальну живучість комплексу.
Врахування топології мережі	Спрощене (стандартні послідовно-паралельні схеми надійності).	Часткове (визначення найбільш критичних точок інфраструктури).	Повне (структурно-топологічний аналіз зв'язності графів, ГІС-моделювання).
Управлінська стратегія	Реактивний ремонт та збільшення технічного резерву обладнання.	Попереднє запобігання загрозам, страхування фінансових ризиків.	Превентивне підвищення адаптивності, живучості та гнучкості всієї системи.

Саме принципи ризик – орієнтованого планування та динамічної стійкості стали науковою основою для розроблених за участю автора державних нормативних

документів – Порядків [8].

Впровадження цих підходів дозволяє оцінювати наступні чотири головні фактори, які впливають на рівень стійкості вітчизняних систем питного водопостачання та водовідведення.

1. Високий рівень централізації та відсутність гнучкості.

Традиційна архітектура систем будувалася навколо надпотужних джерел та лінійно – послідовних магістральних водоводів. У сучасних умовах вихід з ладу одного ключового об'єкта (наприклад, головної станції водопідготовки чи водоводу великого діаметра) призводить до повного зневоднення великих муніципальних районів без можливості оперативної децентралізації та швидкого перемикання потоків [2].

2. Критична енергозалежність.

Низька питома вага автономних джерел енергії та відсутність у технологічних схемах спеціалізованих «насосів блекауту» з низькими пусковими струмами робить інфраструктуру вразливою до системних збоїв та тривалих відключень в енергомережі [1; 5].

3. Реагентна небезпека.

Використання газоподібного хлору на очисних спорудах в умовах ведення бойових дій створює постійні ризики ХБРЯ – загроз регіонального масштабу, що було детально проаналізовано у працях автора [9].

4. Відсутність актуальних інструментів моделювання.

Більшість водоканалів і громад не мають відкаліброваних електронних гідравлічних моделей та інтегрованих ГІС – платформ. Це унеможливорює проведення швидкого сценарного аналізу («що, якщо...») та перешкоджає переходу до превентивного ризик – орієнтованого управління [7].

Головною відмінністю концепції динамічної стійкості є дослідження поведінки системи в часі під час проходження через фази деструктивного впливу. На відміну від теорії надійності, яка констатує лише бінарний стан «працює / не працює», стійкість оцінює глибину падіння експлуатаційних параметрів та швидкість їхнього повернення до цільового рівня.

Моделювання цього процесу за різними стратегіями управління (реактивною та пропонованою автором проактивною стратегією) наведено нижче у Таблиці 1.3.2.

Таблиця 1.3.2

Моделювання функціонально – часового процесу деградації та відновлення системи питного водопостачання та водовідведення за різних стратегій управління

Етап процесу	Реактивна стратегія (традиційний ремонт)	Проактивна стратегія (модель стійкості R(S))
1. Початковий стан	Стабільне функціонування системи на базовому рівні (100% надійності).	Стабільне функціонування з постійним моніторингом вразливостей через ГІС-платформи.
2. Зовнішній негативний вплив (t_b)	Глибоке каскадне падіння працездатності мережі через відсутність захисних бар'єрів.	Мінімальна деградація системи завдяки децентралізації та автономному резервуванню.
3. Фаза відновлення	Тривалий лінійний ремонт елементів в умовах жорсткого дефіциту ресурсів.	Прискорене відновлення функцій за рахунок заздалегідь змодельованих сценаріїв.
4. Кінцевий баланс	Повернення до початкового вразливого технічного стану (ризик повторної аварії).	Вихід на вищий рівень захищеності (модернізація інфраструктури).

Незважаючи на значну кількість міжнародних та вітчизняних досліджень, у вітчизняній інженерній практиці донедавна був відсутній уніфікований методичний інструментарій, який би поєднував заходи технічної модернізації мереж із процесами державного стратегічного планування розвитку територіальних громад. Існуючі методи оцінки часто є однофакторними та абсолютно не враховують технологічну синергію між великими централізованими комплексами та локальними децентралізованими технологіями (наприклад, мобільними станціями очищення, сорбційними бар'єрами порошкоподібного активованого вугілля) у кризових ситуаціях [9; 10].

Саме тому виникає об'єктивна науково – практична потреба у розробці нової

багатокритеріальної моделі оцінки стійкості об'єктів та систем питного водопостачання та водовідведення. Вона має базуватися на обчисленні інтегрального індексу стійкості $R(S)$, що дозволить пріоритизувати інвестиційні та технічні заходи в межах муніципальних схем оптимізації не лише за класичними суто економічними показниками (період окупності, капітальні витрати), а й за фундаментальним критерієм «стійкості» та безпеки життєзабезпечення населення в умовах тривалого дефіциту ресурсів та воєнних криз.

1.4. Обґрунтування напрямку дисертаційного дослідження

Результати проведеного аналізу сучасного стану систем питного водопостачання та водовідведення, особливо в умовах воєнного стану, свідчать про критичну невідповідність між наявними методологічними підходами та реальними загрозами, з якими стикається критична інфраструктура України. Попри фундаментальні напрацювання вітчизняної наукової школи, галузь залишається заручником застарілої концепції статичної надійності, яка не здатна ефективно протидіяти каскадним аваріям, тривалим блекаутам та іншим факторам дестабілізації.

Слід зауважити, що при переході до європейських вимог щодо стійкості систем, практичні інструменти планування та оптимізації залишаються фрагментарними, а нормативно – правова база, хоча і трансформується (зокрема, через впровадження нових Порядків розроблення схем оптимізації 2025 року), потребує подальшого наукового наповнення сучасними інструментами ризик – орієнтованого управління.

Обґрунтування напрямку дослідження базується на наступних ключових позиціях.

1. Перехід до концепції резильєнтності.

Замість спроб досягти «абсолютної» надійності, що є економічно та технічно недосяжним в умовах воєнних загроз, необхідно зосередитися на розвитку здатності системи адаптуватися, абсорбувати екстремальні зовнішні впливи та відновлювати критичні функції в мінімальні терміни.

2. Інтеграція децентралізованих технологій.

Аналіз показав, що виключно централізовані системи є вразливими до

«точкових» ударів. Напрямок дослідження передбачає розробку методів оптимального поєднання централізованих потужностей з автономними модулями (мобільні станції, індивідуальні бар'єрні технології очищення на основі ПАВ тощо).

3. Цифрова верифікація рішень.

На основі виявленої проблеми відсутності актуальних гідравлічних моделей, дослідження спрямоване на впровадження сучасних інструментів геоінформаційного моделювання (QGIS, EPANET), що забезпечить прийняття управлінських рішень на основі верифікованих даних, а не оціночних суджень.

Метою дисертаційного дослідження є розроблення науково – обґрунтованих методів та моделей підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення, які дозволять перейти від реактивного ліквідування аварій до превентивного ризик – орієнтованого управління.

Для досягнення цієї мети поставлено наступні основні завдання.

1. Розробити інтегральний індекс стійкості $R(S)$, що дозволить порівнювати різні сценарії розвитку систем питного водопостачання та водовідведення з урахуванням техніко – економічних та безпекових критеріїв.

2. Проаналізувати сучасний стан та виявити ключові загрози функціонуванню систем питного водопостачання та водовідведення в Україні, зокрема в умовах воєнного стану та зростаючих техногенних і ХБРЯ – ризиків.

3. Розробити систему показників (індикаторів) оцінки поточного стану систем питного водопостачання та водовідведення, що враховують експлуатаційні, енергетичні та безпекові аспекти в умовах екстремальних зовнішніх впливів.

4. Сформулювати методологію побудови багатокритеріальної матриці ризиків, яка дозволяє ідентифікувати, класифікувати та ранжувати загрози критичній інфраструктурі за рівнем їхнього впливу на живучість системи.

5. Розробити уніфіковані алгоритми оптимізації систем, що базуються на принципах функціонального зонування, децентралізації критичних вузлів та підвищення автономності об'єктів.

6. Науково обґрунтувати вибір адаптивних технологічних рішень, зокрема перехід на безпечні методи знезараження води та впровадження енергоефективного

обладнання, для мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій.

7. Створити математичну модель оцінки інтегрального індексу стійкості $R(S)$, яка дозволяє прогнозувати час відновлення та здатність системи до адаптації за різних сценаріїв екстремальних зовнішніх впливів.

8. Удосконалити алгоритми пріоритизації інвестиційних проєктів у схемах оптимізації, впроваджуючи багатокритеріальний підхід до вибору заходів (за технічною, енергетичною, екологічною та безпековою складовими).

9. Сформувати науково – методичні рекомендації щодо впровадження мобільних та децентралізованих бар'єрних технологій як складової частини стратегії резильєнтності громад.

10. Розробити фінансово – технічні моделі, які підвищують інвестиційну привабливість підприємств галузі для міжнародних фінансових інституцій (МФО).

11. Провести апробацію розроблених методів та алгоритмів на прикладі об'єктів критичної інфраструктури міста Дніпро, що дозволить верифікувати математичну модель та довести ефективність запропонованих управлінських рішень.

Для наочності зв'язку між виявленими у попередніх підрозділах проблемами та поставленими завданнями, доцільно структурувати логіку дослідження у вигляді Таблиці 1.4.1.

Таблиця 1.4.1

Зв'язок виявлених проблем, методологічних інструментів та завдань дослідження

Задача (№)	Напрямок впливу на стійкість	Очікуваний результат
1–2	Аналітико-теоретичний	Формалізація поняття «стійкість»
3–4	Методологічний	Система показників та матриця ризиків
5–7	Технологічно-математичний	Алгоритми оптимізації та індекс $R(S)$
8–9	Інженерно-проєктний	Стратегічні рекомендації (ПАВ, очищення)
10–11	Апробаційний	Фінансова модель та впровадження (м. Дніпро)

Як видно з Таблиці 1.4.1, методологія дослідження передбачає ітераційний перехід від теоретичного базису до створення прикладних інструментів, що дозволяє забезпечити комплексність впровадження схем оптимізації.

Таким чином, обраний напрямок дослідження є логічним продовженням праць вітчизняної наукової школи, інтегруючи традиції класичної гідравліки з сучасними викликами енергетичної та безпекової сталості, що створює реальне науково – методичне підґрунтя для кардинальної модернізації інфраструктури України.

Впровадження результатів дисертаційного дослідження у практику діяльності підприємств питного водопостачання та водовідведення дозволить здійснити перехід від реактивного ліквідування наслідків аварій до превентивного ризик – орієнтованого управління. Очікується, що використання розроблених алгоритмів оптимізації забезпечить скорочення часу відновлення функціонування критичних вузлів систем після аварійних чи військових впливів, а також оптимізує енергетичний баланс підприємств шляхом впровадження енергоефективних технологічних рішень.

1.5. Висновки до розділу 1

У першому розділі дисертаційної роботи проведено комплексний аналіз сучасного стану та проблематики забезпечення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення в умовах сучасних глобальних та вітчизняних викликів. За результатами проведених досліджень сформульовано наступні висновки.

1. Аналіз світового досвіду довів, що впровадження Планів безпечного водопостачання (ПБВ) та інтегрованого управління ризиками є безальтернативним механізмом підвищення ефективності та резильєнтності інфраструктури. Ці підходи забезпечують координацію між урядовими органами, приватним сектором та громадою, що є критично важливим для сталого розвитку.

2. Встановлено, що чинна нормативно – правова база України потребувала невідкладної адаптації до сучасних викликів. Результатом проведеної роботи стало розроблення та затвердження нових Порядків, які інтегрують сучасні методи ризик – орієнтованого планування.

3. У межах дослідження створено єдиний системний науково – методичний

підхід до оптимізації, який базується на синергії оцінки ризиків, сценарного планування та фінансового моделювання. Це дозволяє забезпечити сталий розвиток систем, покращити якість життя населення та мінімізувати вплив кризових факторів.

4. Доведено, що сучасна схема оптимізації повинна мати комплексний характер, охоплюючи не лише питне водопостачання, а й водовідведення, енергетичну модернізацію та динамічне фінансове моделювання (життєвого циклу об'єктів), що є ключовою вимогою для залучення міжнародних інвестицій.

5. Реалізація схем оптимізації забезпечується через механізми Державної цільової економічної програми енергетичної модернізації на період до 2030 року, яка затверджена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 15.11.2024 р. № 1133-р, і відкриває можливості для отримання грантових коштів та пільгових кредитів міжнародних фінансових інституцій.

6. Проведений аналіз підтвердив актуальність теми дослідження. Виявлені системні проблеми (гіперцентралізація, енергозалежність, загрози ХБРЯ) диктують необхідність нормативно – методологічного переходу до превентивного управління, яке базується на цифровізації (створення «цифрових двійників» у ГІС), гарантованій енергонезалежності та радикальній мінімізації техногенних ризиків.

Таким чином, результати першого розділу створюють науково – методичне підґрунтя для подальшого розроблення системних підходів до формування схем оптимізації, які стануть основою для кардинальної модернізації інфраструктури питного водопостачання та водовідведення України.

РОЗДІЛ 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ТА КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМ ПИТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ВОДОВІДВЕДЕННЯ

2.1. Характеристика систем питного водопостачання та водовідведення населених пунктів

Сучасний стан систем питного водопостачання та водовідведення України є результатом складної взаємодії історично сформованої лінійно – вузлової архітектури інфраструктури, тривалого недофінансування капітальних ремонтів та масштабних деструктивних впливів, спричинених воєнними діями. Централізованим питним водопостачанням наразі забезпечено понад 99% міст, 89% селищ міського типу та близько 30% сільських населених пунктів. Проте якісні та кількісні показники функціонування цих систем у більшості регіонів не відповідають сучасним стандартам надійності та резильєнтності, а також вимогам Директиви ЄС 2020/2184 [1; 27; 129; 190].

Архітектура більшості муніципальних систем питного водопостачання базується на принципах жорсткої гіперцентралізації. Головними джерелами є поверхневі водозабори (до 75% сумарного об'єму подачі води), серед яких ключове значення мають басейни річок Дніпро, Сіверський Донець, Дністер та Південний Буг. Фізико – хімічний склад поверхневих джерел впродовж останніх десятиліть демонструє стабільну тенденцію до погіршення (антропогенне евтрофування, підвищення концентрацій марганцю, заліза, органічних сполук та залишків пестицидів). Це вступає у суперечність із обмеженими технологічними можливостями діючих очисних споруд, більшість з яких запроектовані за схемами класичної двоступеневої очистки (коагуляція, відстоювання, фільтрація через піщані завантаження) з первинним та вторинним хлоруванням газоподібним хлором або гіпохлоритом натрію [42; 100].

Згідно з аналітичними даними Державної служби статистики України та узагальненими звітними показниками інвентаризації водопровідних мереж, ключовою інженерною проблемою є прогресуючий знос лінійної частини систем [80].

Співвідношення загальної довжини водопровідних мереж до їхньої ветхої та аварійної частини в усередненому розрізі по областях України наведено в Таблиці 2.1.1.

Таблиця 2.1.1

Стан та інфраструктурні показники систем питного водопостачання України (структуровано за макрорегіонами станом на 2025–2026 рр.)

Макрорегіон / Характеристика інфраструктури	Загальна протяжність водопровідних мереж, тис. км	Протяжність ветхих та аварійних мереж, тис. км	Частка аварійних мереж від загальної кількості, %	Середня кількість аварій на 1 км мережі за рік, од./км/рік	Питомі втрати води в мережах (витоки та необліковані витрати), %
Східний регіон (Харківська, Дніпропетровська, Запорізька обл.)	24,6	13,8	56,1	1,82	44,5
Південний регіон (Миколаївська, Одеська, Херсонська обл.)	18,2	11,1	61,0	2,15	48,2
Центральний регіон (Полтавська, Черкаська, Кіровоградська обл.)	15,4	6,8	44,2	0,95	36,0
Північний регіон (Київська, Чернігівська, Сумська, Житомирська обл.)	21,1	9,4	44,5	1,12	38,5
Західний регіон (Львівська, Волинська, Івано-Франківська, Закарпатська обл.)	19,8	8,1	40,9	0,88	32,1
Разом по Україні (усереднено)	99,1	49,2	49,6	1,38	39,8

Висока питома вага аварійних трубопроводів зумовлює значні втрати очищеної питної води в процесі транспортування, які в окремих комунальних підприємствах (особливо у Південному макрорегіоні) перевищують 45–50%, що є неприпустимим з

погляду ресурсозбереження та стійкості підприємств. Наслідком високої аварійності є систематичне виникнення гідродинамічних ударів, депресій тиску та вторинне мікробіологічне і хімічне забруднення води безпосередньо у водопровідній мережі через явище інфільтрації ґрунтових вод при відключеннях систем [4; 55; 178].

Для унаочнення просторового розподілу деструктивних процесів та їх динаміки, нижче наведено графічний аналіз втрат води та питомої аварійності по роках (Рисунок 2.1.1).



Рисунок 2.1.1. Динаміка питомої аварійності мереж та обсягів втрат питної води в Україні за період 2018–2026 рр.

Аналіз часового ряду на Рисунку 2.1.1 свідчить, що починаючи з 2022 року спостерігається різкий експоненціальний злам тренду в бік погіршення показників. Це безпосередньо пов'язано з фізичним пошкодженням інфраструктури, гідравлічними ударами від раптових зупинок насосних станцій при дефіциті електроенергії (блекаутах) та неможливістю проведення планово – попереджувальних ремонтів у прифронтових та деокупованих областях.

Згідно з дослідженнями аналітичного центру Київської школи економіки, прямі збитки інфраструктури водопостачання та водовідведення внаслідок руйнувань

обчислюються мільярдами доларів США [28]. Характер пошкоджень структурних елементів муніципальних систем питного водопостачання та водовідведення деталізовано на Рисунку 2.1.2.



Рисунок 2.1.2. Структурний розподіл пошкоджень та руйнувань об'єктів питного водопостачання та водовідведення України за даними KSE Institute, % від загальної кількості об'єктів

Аналогічна деструктивна тенденція та прогресуючий лінійний і технологічний знос простежуються й у функціонуванні муніципальних систем водовідведення. Зниження обсягів водовідведення внаслідок міграційних процесів та встановлення засобів обліку у споживачів призвело до зменшення швидкостей руху рідини у каналізаційних колекторах. Це викликає масову седиментацію (замулювання) лінійної частини, інтенсифікацію процесів газової корозії трубопроводів та каскадне зростання питомої аварійності [8; 135; 48; 121].

Співвідношення загальної протяжності каналізаційних мереж до їхньої аварійної частини, а також дефіцит потужностей очисних споруд у розрізі макрорегіонів України зведено в Таблиці 2.1.2.

Таблиця 2.1.2

Стан та інфраструктурні показники систем водовідведення України
(структуровано за макрорегіонами станом на 2025–2026 рр.)

Макрорегіон / Характеристика інфраструктури водовідведення	Загальна протяжність каналізаційних мереж, тис. км	Протяжність ветхих та аварійних колекторів, тис. км	Частка аварійних мереж водо- відведення, %	Середня кількість аварій на 1 км колектора за рік, од./км/рік	Питома вага стічних вод, що очи- щуються невідповідно до норма- тивів (через дефіцит КОС), %
Східний регіон (Харківська, Дніпропетровська, Запорізька обл.)	14,2	8,2	57,7	2,10	48,5
Південний регіон (Миколаївська, Одеська, Херсонська обл.)	9,8	6,3	64,3	2,48	54,2
Центральний регіон (Полтавська, Черкаська, Кіровоградська обл.)	8,6	3,9	45,3	1,15	32,0
Північний регіон (Київська, Чернігівська, Сумська, Житомирська обл.)	12,4	5,8	46,8	1,32	39,4
Західний регіон (Львівська, Волинська, Івано- Франківська, Закарпатська обл.)	11,5	4,5	39,1	0,94	28,6
Разом по Україні (усереднено)	56,5	28,7	50,8	1,60	40,5

Аналіз даних Таблиці 2.1.2 свідчить, що більше половини (50,8%) каналізаційних

мереж України перебувають у ветхому та аварійному стані. Найбільш критична ситуація зафіксована у Південному та Східному макрорегіонах, де питома аварійність сягає 2,10–2,48 од./км/рік, що обумовлює значні ризики ексфільтрації незахищених зворотних вод у водоносні горизонти та підтоплення міських територій [17; 80; 111].

Більшість очисних споруд стічних вод (КОС) в Україні експлуатуються понад 40–50 років без глибокої реконструкції. Технологічні схеми очистки стічних вод базуються на класичному методі повного біологічного очищення у водному середовищі за допомогою активованого мулу (аеротенки – відстійники). Проте конструктивні параметри аеротенків не розраховані на видалення сучасних концентрацій азоту амонійного та фосфатів, оскільки за останні десятиліття питоме водовідведення від населення скоротилося (через встановлення лічильників), а концентрація забруднюючих речовин у зворотних водах різко зросла. Це призводить до винесення значних обсягів біогенних елементів у відкриті водойми, викликаючи вторинну деградацію річкових екосистем, що є джерелами питного водопостачання для міст, розташованих нижче за течією [62; 163; 167; 196].

Інтегрована структурно – технологічна архітектура класичної муніципальної системи та зони виникнення системних ризиків і вразливостей, які досліджуються у цій дисертаційній роботі, представлена у вигляді схеми (Рисунок 2.1.3).



Рисунок 2.1.3. Схема інтегрованої архітектури муніципальної системи питного водопостачання та водовідведення із локалізацією критичних областей ризику:

1. Водозабірний вузол (ризик антропогенного забруднення та ХБРЯ – загроз);
2. Станція водопідготовки (техногенна небезпека складів газоподібного хлору, відсутність сорбційних бар'єрів ПАВ);
3. Магістральні водоводи та регулюючі ємності (дефіцит гідродинамічного тиску, вторинне біообростання);
4. Розподільча міська мережа (високий аварійний індекс, витoki води);
5. Каналізаційні насосні станції (КНС) (вразливість до енергетичних блекаутів);
6. Каналізаційні очисні споруди (КОС) (недосконалість видалення сполук азоту і фосфору, проблема утилізації осаду).

На основі аналізу Національних доповідей про якість питної води встановлено, що у регіональному розрізі спостерігається чітка просторова неоднорідність відхилень якості води від вимог ДСанПіН 2.2.4-171-10. У південних областях (Одеська, Миколаївська) домінують відхилення за мінералізацією, сухим залишком, сульфатами та хлоридами, що зумовлено природними особливостями джерел та підтягуванням мінералізованих підземних вод. У східних та центральних регіонах фіксуються значні перевищення за вмістом заліза загального, марганцю та показником перманганатної окиснюваності [7; 78; 138; 152].

Описаний дисбаланс між фактичними концентраціями забруднюючих речовин на вході до КОС та проєктними можливостями споруд підтверджується довгостроковими трендами якісних показників.

Така стійка тенденція до каскадного зростання концентрацій азоту амонійного та фосфатів у зворотних водах формує загрозу антропогенного евтрофування транскордонних водотоків. Це замикає деструктивний технологічний цикл, оскільки винесення надлишку біогенів у відкриті водойми призводить до каскадного погіршення якості води у замикаючих створах нижче за течією, які одночасно слугують джерелами питного водозабору для суміжних громад. Відтак, превентивна інтенсифікація процесів глибокого видалення N та P на спорудах біологічної очистки стає базовою умовою забезпечення проактивної резильєнтності всієї регіональної сфери питної води та питного водопостачання та водовідведення.

Зміна питомих концентрацій головних біогенних елементів у вихідних стічних

водах великих міст України протягом останніх років та їх порівняння з гранично допустимими скидами (ГДС) згідно з європейськими нормативами наведено на Рисунку 2.1.4.

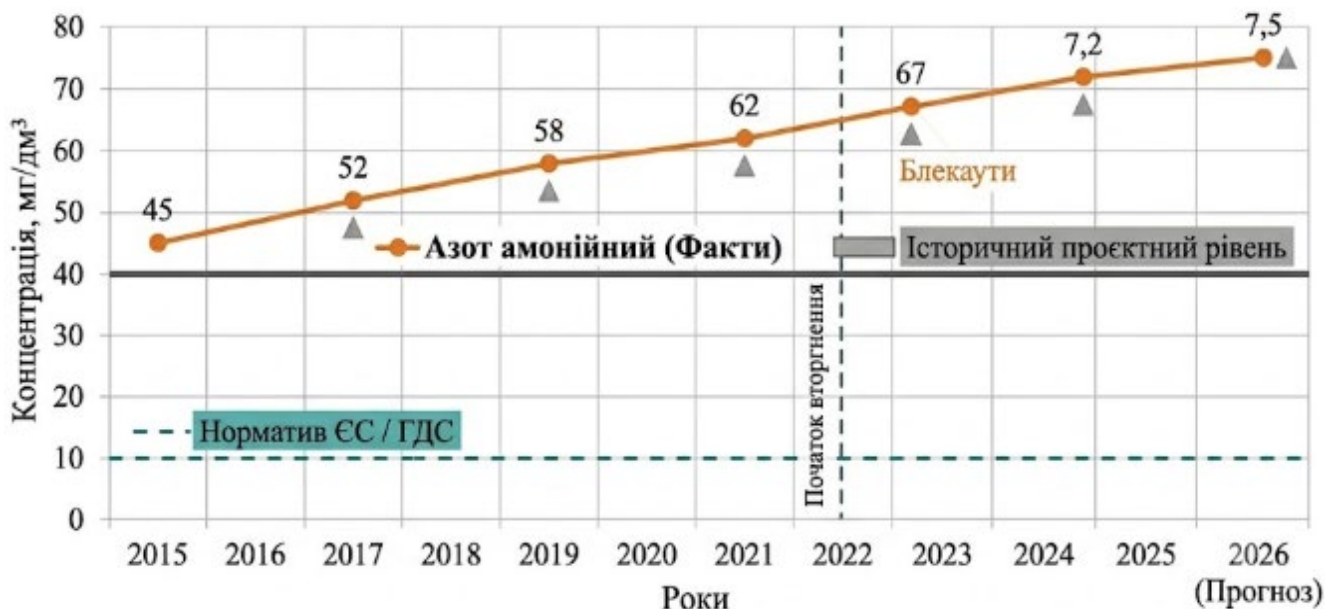


Рисунок 2.1.4. Динаміка зростання концентрації азоту амонійного у поступаючих на КОС стічних водах України внаслідок скорочення питомого водоспоживання населення

Це науково підтверджує висновок про те, що інтенсифікація процесів вилучення сполук азоту та фосфору на КОС більше не може базуватися на традиційних алгоритмах технологічного регулювання, а потребує глибокої структурної модернізації та переходу до адаптивно – гібридних технологій біо – сорбційного очищення.

Таким чином, комплексне дослідження сучасного стану систем питного водопостачання та водовідведення в Україні дозволяє сформулювати наступні системні суперечності, на вирішення яких спрямовано дану дисертаційну роботу.

По-перше, між необхідністю безперебійного надання послуг питного водопостачання у режимі постійних надзвичайних ситуацій (воєнний стан, блекаути) та технічно зношеною, жорстко централізованою архітектурою наявних мереж.

По-друге, між новими жорсткими екологічними вимогами євроінтеграційного

законодавства щодо якості очищення стічних вод і реагентної безпеки та реальними технологічними можливостями застарілих очисних комплексів громад.

По-третє, між обмеженими ресурсами муніципальних підприємств та колосальною капіталомісткістю проєктів повної модернізації інфраструктури, що вимагає розробки точних математичних методів пріоритизації інвестицій на основі оцінки вартості життєвого циклу.

Вказані чинники обґрунтовують безальтернативність переходу до превентивного ризик – орієнтованого управління інфраструктурою шляхом обов'язкового розроблення муніципальних схем оптимізації систем питного водопостачання та водовідведення на базі сучасних інструментів геоінформаційного та гідравлічного моделювання.

2.2. Перспективи розвитку систем питного водопостачання та водовідведення в Україні

Перспективний розвиток муніципальних систем питного водопостачання та водовідведення в Україні на сучасному етапі має базуватися на фундаментальному переході від концепції «статичної інженерної надійності» (розрахованої на детерміновані умови мирного часу) до парадигми «проактивної динамічної стійкості» (резильєнтності) [39; 66]. Стратегічне планування відновлення критичної інфраструктури громад до 2030 року вимагає повного відходу від застарілих лінійно – вузлових архітектурних рішень та впровадження гнучких інженерно – технологічних сценаріїв, що повністю відповідають вимогам Директиви ЄС 2020/2184 [129; 190] та Закону України «Про критичну інфраструктуру» [21].

Основними перспективними напрямками модернізації лінійної та технологічної частин систем питного водопостачання є:

1. Створення інтегрованих «цифрових двійників» водопровідних мереж (на базі GIS, EPANET) дозволяє в реальному часі виконувати превентивне сценарне моделювання нестационарних кризових режимів, оперативно локалізувати зони зниження гідродинамічного тиску та оптимізувати роботу енергоефективного насосного обладнання [41; 189].

2. Пріоритетним завданням є ліквідація потенційно небезпечних складів газоподібного хлору, особливо в зонах можливих безпекових викликів. Перспектива розвитку передбачає перехід на безпечні безхлорні реагенти (електролізний гіпохлорит натрію, діоксид хлору) у поєднанні з обов'язковим розгортанням сорбційних бар'єрів на основі порошкового активованого вугілля (ПАВ) для абсорбції загрози антропогенних та ХБРЯ – забруднень джерел [22; 40; 122; 139].

3. Для мінімізації наслідків тотальних енергетичних колапсів (блекаутів) перспективним є впровадження спеціалізованих насосних агрегатів із низькими пусковими струмами («насосів блекауту») та інтеграція автономних джерел живлення (СЕС, дизель – генераторних комплексів) безпосередньо у вузли регулюючих ємностей [36; 144].

У сфері систем водовідведення довгострокові перспективи розвитку пов'язані з радикальною перебудовою технологічного ланцюга каналізаційних очисних споруд (КОС). Головним вектором є впровадження технологій глибокого біологічного видалення біогенних елементів (сполук азоту та фосфору) для запобігання екологічній деградації та евтрофуванню водних об'єктів [8; 62].

Паралельно з цим, невід'ємною складовою модернізації очисних комплексів є вирішення критичної проблеми обробки, стабілізації та подальшої утилізації значних обсягів сирих осадів і надлишкового активованого мулу. Перспективні інженерні рішення передбачають обов'язкове впровадження вискоєфективних технологій механічного зневоднення, термофільного анаеробного зброджування у метантенках з одержанням біогазу, а також впровадження низькотемпературного сушіння для максимального зниження об'єму відходів. Реалізація цих підходів дозволить не лише мінімізувати екологічне навантаження на муніципальні території, а й забезпечити часткову енергетичну автономність самих КОС за рахунок когенерації [19, 126]. Відтак, комплексна інтеграція зазначених технологічних заходів вимагає чіткої математичної параметризації та визначення капіталомісткості їхнього впровадження в межах загальної інвестиційної стратегії розвитку громад до 2030 року [33, 54].

Сценарні показники капіталомісткості та пріоритетності впровадження комплексних заходів модернізації інфраструктури питного водопостачання та

водовідведення України наведено в Таблиці 2.2.1.

Таблиця 2.2.1

Перспективні сценарії та інвестиційно – технологічні показники модернізації систем питного водопостачання та водовідведення України до 2030 року

Технологічний сектор інфраструктури	Комплекс перспективних інженерних заходів розвитку	Цільовий індекс стійкості системи, R(S)	Необхідний обсяг інвестицій, млн євро / тис. жителів	Рівень пріоритету (за 1000-б. шкалою)
Очисні споруди водопроводу (ОСВ)	Ліквідація складів газоподібного хлору, будівництво електролізних станцій, монтаж дозаторів ПАВ, впровадження систем раннього ХБРЯ-моніторингу.	0,92 / 1,0	12,5 – 15,0	Невідкладний (920)
Лінійна частина водопроводу та НС-II	Санація аварійних магістралей, зонування мереж (DMA), встановлення частотних регуляторів, розгортання цифрових двійників у GIS.	0,88 / 1,0	35,0 – 42,0	Високий (810)
Каналізаційні насосні станції (КНС)	Монтаж дробирок-подрібнювачів крупних включень, встановлення заглибних насосів, автоматизація аварійного перемикання на АВР та дизель-генератори.	0,85 / 1,0	8,0 – 11,2	Найвищий (890)
Каналізаційні очисні споруди (КОС)	Реконструкція аеротенків з облаштуванням анаеробно-аноксидних зон (денітри-дефосфотація), модернізація вторинних відстійників, будівництво цехів зневоднення осаду.	0,90 / 1,0	45,0 – 60,0	Високий (840)
Децентралізовані адаптивні вузли	Закупівля та стратегічне розміщення мобільних водоочисних установок контейнерного типу для автономного забезпечення критичних соціальних об'єктів (лікарень, шпиталів).	0,95 / 1,0	3,5 – 5,0	Невідкладний (950)

Формування нової парадигми розвитку, зведеної у Таблиці 2.2.1, передбачає обов'язковий відхід від реактивного усунення наслідків інфраструктурних аварій на користь превентивного ризик – орієнтованого управління. Важливою умовою успішної реалізації цих перспективних сценаріїв є їх узгодження з розробленням місцевих муніципальних схем оптимізації. Математично обґрунтований баланс між капітальною модернізацією централізованих комплексів та інтеграцією локальних мобільних систем доочищення дозволить забезпечити гарантовану живучість міської інфраструктури в умовах тривалих блекаутів, воєнних впливів та кліматичних аномалій, що повністю відповідає стратегічним цілям сталого розвитку територіальних громад України [38; 73; 74].

2.3. Науково - методична база дослідження

Науково – методична база дисертаційної роботи ґрунтується на фундаментальних положеннях системного підходу до аналізу складних інженерних інфраструктур. Основу дослідження становить інтеграція методів математичного моделювання, ризик – орієнтованого управління та геоінформаційних технологій, що в сукупності дозволяє адаптувати класичні методи гідравліки до сучасних концепцій стійкості в умовах динамічного впливу зовнішніх загроз [63; 64].

Для розв'язання поставлених завдань у роботі застосовано такий комплекс загальнонаукових та спеціальних методів.

1. Методи системного аналізу, декомпозиції та узагальнення – для комплексного вивчення сучасного стану систем питного водопостачання та водовідведення, виявлення структурних зв'язків і закономірностей у їх функціонуванні, а також ідентифікації ключових вразливостей і критичних вузлів. За допомогою діаграми причинно – наслідкових зв'язків (діаграми Ісікави) структуровано фактори впливу на загальну стійкість інфраструктури [3; 10].

2. Метод ризик–орієнтованого планування – для ідентифікації, класифікації та кількісної оцінки впливу ймовірних негативних подій (зокрема, військових руйнувань, енергетичних блекаутів та ХБРЯ – загроз). На основі цього методу побудовано багатокритеріальну матрицю ризиків та запропоновано алгоритм

сценарного моделювання кризових ситуацій [101; 150].

3. Логіко – математичне моделювання та оптимізація – для розроблення багатокритеріальної моделі оцінювання стійкості (резильєнтності), формування цільової функції стійкості $R(S)$ з урахуванням множини цілей, обмежень, управлінських рішень та ймовірних ризиків. Метод дозволив структурувати процес переходу від елементарних експлуатаційних даних до агрегованих інтегральних оцінок та знайти оптимальні управлінські рішення при заданих ресурсних обмеженнях [113; 120].

4. Метод аналізу ієрархій (метод Сааті) – для експертного визначення вагових коефіцієнтів цільових критеріїв стійкості, що забезпечило об'єктивність вибору пріоритетних технічних рішень та інвестиційних заходів під час багатокритеріального вибору в межах розроблення схем оптимізації [66].

5. Гідравлічне моделювання та геопросторовий аналіз – із застосуванням сучасних ГІС – технологій (на базі платформи QGIS) та спеціалізованого програмного забезпечення для гідродинамічних розрахунків (EPANET). Створення просторових топологічних моделей та «цифрових двійників» дозволило верифікувати запропоновані технічні рішення, змодельовати поширення забруднень, а також оперативно визначати такий критичний показник, як тиск у мережах під час імітації каскадних відмов [134; 162].

6. Нормативно – аналітичний метод та стратегічне планування – для гармонізації розроблених інженерно – технологічних рішень із чинною нормативно – правовою базою та міжнародними стандартами (включаючи вимоги ВООЗ щодо Планів безпечного водопостачання). Результати застосування цього методу стали основою для нових Порядків [73].

7. Метод бенчмаркінгу – для порівняльного аналізу енергоефективності, технологічних та експлуатаційних показників підприємств, що дозволило виявити «вузькі місця» в інфраструктурі та обґрунтувати перелік першочергових заходів [50; 83].

Запропоноване поєднання якісних та кількісних методів дозволило забезпечити високу наукову достовірність і обґрунтованість прийняття рішень щодо підвищення

стійкості систем питного водопостачання та водовідведення на всіх рівнях управління. Відповідність застосованих методів конкретним завданням дослідження наведено нижче у Таблиці 2.3.1.

Таблиця 2.3.1

Матриця відповідності методів завданням дослідження

Завдання дослідження	Застосований метод	Інструментарій / Модель	Результат застосування
Аналіз сучасного стану систем, виявлення загроз та вразливостей	Системний аналіз, декомпозиція, бенчмаркінг	Діаграма Ісікави, компаративні таблиці	Структурована ієрархія причинно-наслідкових зв'язків впливу на стійкість
Ідентифікація та ранжування ризиків функціонування	Ризик-орієнтоване планування	Багатокритеріальна матриця ризиків	Класифікація загроз за 4 зонами безпеки
Кількісна та якісна оцінка рівня стійкості інфраструктури	Логіко-математичне моделювання	Цільова функція стійкості $R(S)$	Розрахунок інтегрального індексу стійкості
Вибір оптимальних технічних рішень та пріоритезація заходів	Метод аналізу ієрархій (метод Сааті)	Матриця парних порівнянь	Вагові коефіцієнти критеріїв стійкості, план інвестицій
Верифікація інженерних рішень та сценарне моделювання	Гідравлічне моделювання та геопросторовий аналіз	Програмні комплекси QGIS, EPANET	«Цифрові двійники», просторові ізохрони, визначення зон критичного зниження тиску у мережах

Логіку та архітектуру наукового пошуку, що відображає поетапне застосування обраної методології для досягнення цілей дисертаційного дослідження, наведено на структурно – логічній схемі (Рисунок 2.3.1).

Представлена у Таблиці 2.3.1 матриця відповідності доводить, що вирішення комплексної інженерно – екологічної проблеми стійкості систем критичної інфраструктури не може обмежуватися окремими аналітичними методами. Інтеграція

класичного гідравлічного розрахунку з експертними матрицями парних порівнянь та багатокритеріальною оптимізацією цільової функції стійкості $R(S)$ дозволяє усунути суб'єктивізм при стратегічному плануванні. Це забезпечує наскрізну верифікацію прийнятих рішень – від первинного виявлення технологічних вразливостей за допомогою причинно – наслідкових зв'язків до фізичного моделювання поведінки систем у ГІС – середовищі під час імітації екстремальних умов [41; 134].



Рисунок 2.3.1. Структурно – логічна схема методології дослідження

2.4. Концептуальна модель розроблення схем оптимізації

Розроблення схем оптимізації систем централізованих водопостачання та водовідведення у сучасних умовах вимагає відмови від спрощених підходів на

користь комплексної концептуальної моделі, що інтегрує технічні, енергетичні та безпекові аспекти. Запропонована модель базується на системному поєднанні нормативних вимог розроблених та затверджених Порядків та авторського наукового підходу до підвищення стійкості інфраструктури.

Концептуальна модель розроблення схем оптимізації розглядається як ітераційний процес, що складається з п'яти взаємопов'язаних блоків (Таблиця 2.4.1).

1. Аналітико – інформаційний блок.

Збір та систематизація даних про стан мереж і споруд, цифровізація об'єктів у ГІС–середовищі, проведення технічного та енергетичного аудиту. На цьому етапі формується «цифровий двійник» системи, що є обов'язковою вимогою Порядків.

2. Блок ідентифікації та оцінки ризиків.

Виявлення «вузьких місць» та оцінка вразливості системи до зовнішніх (військові дії, блекаути) та внутрішніх (зношеність, реагентна небезпека) загроз. Використання багатокритеріальної матриці ризиків дозволяє ранжувати загрози.

3. Блок варіантного моделювання.

Формування альтернативних сценаріїв розвитку (базового, оптимізаційного та адаптивного). Кожен сценарій проходить верифікацію за допомогою гідравлічного моделювання для підтвердження його технічної реалістичності.

4. Блок оптимізації та вибору рішень.

Застосування розробленої математичної моделі для вибору оптимального сценарію за критерієм максимізації інтегрального показника стійкості $R(S)$.

5. Блок стратегічного планування.

Формування черговості заходів, інвестиційного плану та механізмів актуалізації схеми оптимізації.

Центральним елементом моделі є перехід від простої заміни аварійних ділянок до управління функціональним станом системи. Логіка моделі замикається на досягненні цільового стану стійкості, що формалізується як:

$$S_{\text{target}} = f(C, E, R, T) \rightarrow \text{opt} \quad (2.4.1)$$

де:

C – конфігурація системи (ступінь децентралізації та резервування);

Е – енергетична незалежність (оптимізація енергоспоживання);

Р – рівень реагентної та ХБРЯ – безпеки;

Т – технічна надійність (мінімізація втрат та відмов).

Концептуальна модель передбачає ієрархічність прийняття рішень, що відповідає державній вертикалі управління.

На національному рівні – методологічне забезпечення та встановлення нормативних індикаторів стійкості, що фактично реалізовано через розроблені і затверджені Порядки.

На муніципальному рівні – розроблення конкретних схем оптимізації громад із врахуванням місцевих ризиків та гідрогеологічних умов.

На об'єктному рівні – впровадження інженерних рішень, що підвищують локальну витривалість вузлів.

Таблиця 2.4.1

Характеристика блоків концептуальної моделі розроблення схем оптимізації

Блок моделі	Основні завдання	Очікуваний результат
1. Аналітико-інформаційний	Цифровізація об'єктів у ГІС, технічний та енергетичний аудит	База даних, «цифровий двійник» мережі
2. Ідентифікації та оцінки ризиків	Аналіз вразливостей, застосування багатокритеріальної матриці	Ранжований перелік внутрішніх та зовнішніх загроз
3. Варіантного моделювання	Розробка сценаріїв, гідравлічна верифікація	Технічно обгрунтовані альтернативи розвитку
4. Оптимізації та вибору рішень	Максимізація інтегрального показника стійкості R(S)	Оптимальний сценарій (адаптивний/базовий)
5. Стратегічного планування	Формування інвестиційного плану, механізми актуалізації	Затверджена схема оптимізації, черговість заходів

Архітектуру наукового підходу та взаємозв'язок ієрархічних рівнів з етапами ітераційного процесу наведено на структурно – логічній схемі (Рисунок 2.4.1).

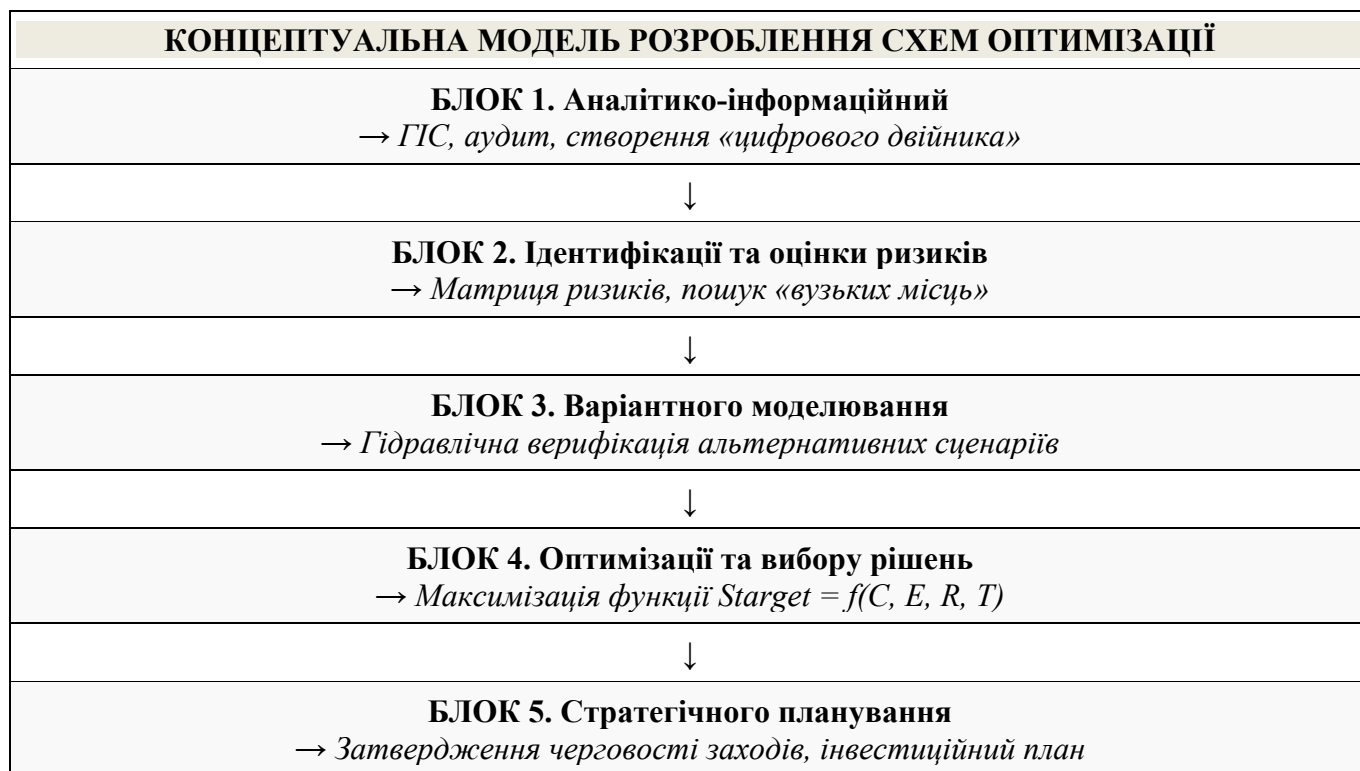


Рисунок 2.4.1. Архітектура концептуальної моделі та ітераційних блоків розроблення схем оптимізації

2.5. Висновки до розділу 2

У другому розділі сформовано теоретико – методологічний фундамент дослідження, розгорнуто науково – методичний апарат та запропоновано авторську концептуальну модель, що в сукупності дозволяє вирішити наукове завдання щодо підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення в умовах сучасних деструктивних впливів. Основні наукові та практичні результати другого розділу полягають у наступному.

1. Сформовано комплексний науково – методичний апарат, який базується на системному поєднанні традиційних методів гідравліки із сучасними інструментами ризик – орієнтованого планування, багатокритеріального аналізу (метод Сааті) та цифрового моделювання. Інтеграція геоінформаційних систем (QGIS) та гідродинамічних розрахункових комплексів (EPANET) дозволила створити методологічну базу для побудови «цифрових двійників» інфраструктури та проведення імітаційного сценарного моделювання кризових ситуацій, включаючи оцінку динаміки тиску у мережах при каскадних відмовах.

3. Розроблено авторську концептуальну модель розроблення схем оптимізації систем централізованого водопостачання та водовідведення. На відміну від існуючих статичних підходів, модель запропоновано як ітераційний процес, що складається з п'яти логічно пов'язаних блоків: аналітико – інформаційного, ідентифікації та оцінки ризиків, варіантного моделювання, оптимізації та вибору рішень, а також стратегічного планування. Це забезпечує перехід від концепції ліквідації наслідків аварій до проактивного управління функціональним станом систем.

4. Вперше формалізовано критерії досягнення цільового стану стійкості муніципальної інфраструктури у вигляді математичної залежності $S_{\text{target}} = f(C, E, R, T) \rightarrow \text{opt}$. Запропонована функція інтегрує чотири критичні виміри функціонування систем: просторову конфігурацію (ступінь децентралізації та резервування), енергетичну незалежність та оптимізацію енергоспоживання, рівень реагентної та ХБРЯ – безпеки, а також комплексну технічну надійність (мінімізацію втрат напору та відмов елементів). Це створює математичну основу для багатокритеріального вибору оптимальних сценаріїв розвитку.

5. Обґрунтовано принцип трирівневої ієрархічності прийняття рішень у процесі оптимізації інфраструктури громади. Доведено необхідність системного узгодження національного рівня (державне методологічне забезпечення та затверджені Порядки), муніципального рівня (розроблення конкретних схем оптимізації з урахуванням місцевих гідрогеологічних умов та профілю загроз) та об'єктного рівня (впровадження конкретних інженерних рішень для підвищення витривалості окремих технологічних вузлів та споруд).

Сформована науково – методична база та концептуальна модель безпосередньо використані у наступних розділах дисертаційного дослідження для проведення практичних гідродинамічних розрахунків, оцінки ризиків та формування оптимізаційних рішень для об'єктів питного водопостачання та водовідведення.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМНИХ ПІДХОДІВ ДО ФОРМУВАННЯ СХЕМ ОПТИМІЗАЦІЇ СИСТЕМ ПИТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ВОДОВІДВЕДЕННЯ

3.1. Система індикаторних показників для оцінки стану та ефективності систем питного водопостачання та водовідведення

Оцінка сучасного стану систем питного водопостачання та водовідведення в умовах нестабільності вимагає переходу від галузевих показників експлуатації до комплексної системи індикаторів, що базуються на принципах системного аналізу, комплексного моделювання, ризик – орієнтованого управління. В межах даного дослідження розроблено ієрархічну систему показників, яка інтегрована у нормативні вимоги Порядків та дозволяє кількісно оцінити рівень стійкості інфраструктури.

Системи питного водопостачання та водовідведення є невід’ємною складовою інфраструктури будь-якого населеного пункту, що забезпечує базові потреби населення та функціонування господарського комплексу. Ефективне управління цими системами, оцінка їх поточного стану та планування розвитку є критично важливими завданнями, особливо в контексті зростаючих антропогенних навантажень, кліматичних змін та необхідності забезпечення сталого розвитку. Формування адекватної системи показників дозволяє не тільки об’єктивно оцінювати ефективність функціонування систем питного водопостачання та водовідведення, але й ідентифікувати «вузькі місця», визначати пріоритетні напрямки модернізації та залучати інвестиції.

В Україні незважаючи на наявність окремих методик та переліків показників, існує потреба в узагальненні та систематизації підходів до їх формування, що враховували б комплексність систем питного водопостачання та водовідведення як єдиного технологічного ланцюга – від джерела водопостачання до очищення стічних вод та повернення їх у навколишнє природне середовище. Важливим аспектом є також інтеграція показників стійкості цих систем до різноманітних ризиків, які виникають на різних етапах технології.

В рамках виконання дослідження було взято за мету розроблення та

обґрунтування комплексної системи показників поточного стану та розвитку систем питного водопостачання та водовідведення, адаптованої до сучасних вимог українського законодавства та міжнародних практик.

Для досягнення поставленої вище мети було зроблено:

- системний аналіз у вигляді розгляду систем питного водопостачання та водовідведення як складної системи, що включає джерела, мережі транспортування, споруди підготовки та очищення, а також споживачів, які до них приєднані, з метою виявлення взаємозв'язків між елементами та формуванням комплексних показників;
- концептуальне моделювання у вигляді розробки логіко-математичної моделі процесу формування показників поточного стану та розвитку систем питного водопостачання та водовідведення, що дозволяє структурувати процес переходу від елементарних даних до агрегованих оцінок;
- класифікація та групування у вигляді систематизації показників за різними аспектами функціонування систем питного водопостачання та водовідведення (технічні, економічні, екологічні, соціальні, показники стійкості).

Інформаційною базою дослідження слугували нормативно – правові акти України, наукові публікації, а також матеріали дисертаційних досліджень, що стосуються проблематики оцінки та розвитку систем питного водопостачання та водовідведення.

Розглянемо системи питного водопостачання та водовідведення як складні системи, що включають джерела, мережі транспортування, споруди підготовки та очищення, а також споживачів, які до них приєднані, з метою виявлення взаємозв'язків між елементами та формуванням комплексних показників.

Виконання комплексної оцінки поточного стану систем з перспективою розвитку – це перший крок на шляху до підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення.

Поточний стан систем визначається комплексом показників, які відображають технічні, економічні, соціальні та екологічні аспекти.

Поняття «стійкість систем» визначається як якість, що дозволяє системі витримувати зміни параметрів зовнішнього середовища, відмінні від розрахункових.

Система може бути названа «стійкою», якщо вона в змозі впоратися з варіаціями (іноді непередбачуваними) в операційному середовищі з мінімальними: збитками, змінами або втратою функціональності. Тобто, це відношення або кількісний взаємозв'язок між отриманим розрахунковим результатом (вихідним показником) і вхідним показником – фактичним результатом, який враховує витримані зміни.

Стійкість систем тісно пов'язана зі структурою, надійністю та якістю наданих (спожитих) послуг централізованих водопостачання та водовідведення. З позицій системного аналізу необхідний комплексний розгляд джерела питного водопостачання або водовідведення, систем і приєднаних до них споживачів, що визначає номенклатуру показників, які характеризують поточний стан і розвиток систем питного водопостачання та водовідведення населеного пункту.

Кожен із зазначених елементів виконує специфічні функції, але водночас є складовою єдиної системи, у межах якої постійно відбувається обмін матеріальними, енергетичними та інформаційними потоками. Ефективність функціонування таких систем визначається не лише якістю роботи окремих компонентів, але й характером взаємозв'язків між ними. Зокрема, зміни у характеристиках одного елемента (наприклад, зниження дебіту водозабору або зростання навантаження на очисні споруди) здатні спричинити суттєві наслідки для всієї системи, знижуючи її стійкість, енергоефективність чи надійність.

У рамках системного підходу важливим завданням є ідентифікація та кількісна оцінка основних взаємозв'язків між структурними елементами. Для цього застосовуються методи структурного моделювання, функціонально – вартісного аналізу, ієрархічного декомпонування, а також інструменти багатокритеріального оцінювання. На основі такого аналізу можливо формувати інтегральні або комплексні показники, які відображають ефективність, надійність, стійкість чи адаптивність системи в цілому. До прикладу, інтегральний показник стійкості може враховувати коефіцієнт забезпеченості питною водою, енергоємність транспортування, втрати у мережах, ефективність очищення води та рівень задоволеності споживачів.

Застосування системного аналізу дозволяє виявити «вузькі місця» у функціонуванні систем питного водопостачання та водовідведення, обґрунтувати

пріоритетні напрями модернізації, забезпечити підвищення їх стійкості до зовнішніх викликів, таких як зміна клімату, зростання навантаження через релокацію, урбанізацію або дефіцит енергоресурсів. Таким чином, системний підхід виступає основою для розробки та формування показників поточного стану та розвитку систем питного водопостачання та водовідведення. Цей процес є багатоетапним, що вимагає врахування специфіки функціонування цих систем та цілей управління.

На основі проведеного аналізу пропонується концептуальний підхід, що базується на логіко – математичній моделі та ієрархічній структурі показників.

Метою цієї моделі є опис процесу, який починається з початкового стану системи питного водопостачання та водовідведення і через низку етапів розвитку (трансформацій) призводить до кінцевого бажаного стану.

Приймаємо і формулюємо ланцюг прийнятих понять і зв'язків, які визначають зміст структури предметної області, що розглядається:

S^0, S^1, S^1, S^P – початковий, перший, проміжний і кінцевий показник поточного стану та розвитку систем питного водопостачання та водовідведення;

$0, 1, I, P$ – кількісна величина зміни показника у певний рівномірний період часу;

F – зовнішні фактори впливу;

A – критерії вибору показника;

L – обмеження під час вибору показника;

M – параметри показника;

ПРВП – процедура розробки вибору показника;

КБ – комплексний баланс;

ДПНЗ – діаграми причинно – наслідкових зв'язків;

МП – моделі показника;

ВПУО – вибір показника в умовах обмежень;

X_1, X_2, X_3 – безліч варіантів показників розвитку, які пов'язані з джерелом та/або системами питного водопостачання або водовідведення, і приєднаними до них споживачами (адміністративні та житлові будинки);

X_{1j}, X_{2j}, X_{3j} – елементарні показники;

$P^{(i)}$ – показник на i -ому етапі розвитку.

Логіко – математичне формулювання концептуальної моделі процесу формування показників поточного стану та розвитку систем питного водопостачання та водовідведення передбачає, що початковий показник поточного стану та розвитку характеризується вектором стану:

$$S^{(0)} = \{ S^{(0)}_1, \dots, S^{(0)}_z, \dots, S^{(0)}_r \}, \quad (3.1.1)$$

де $S^{(0)}_z$ - z -тий елементарний показник на початковому етапі.

Проміжний i -тий стан характеризується вектором:

$$S^{(i)} = \{ S^{(i)}_1, \dots, S^{(i)}_z, \dots, S^{(i)}_r \}, \quad (3.1.2)$$

де $S^{(i)}_1, \dots, S^{(i)}_z, \dots, S^{(i)}_r$ – показники стану та розвитку систем питного водопостачання та водовідведення на етапах $0, 1, \dots, i, \dots, p$.

Під час впровадження заходів з розвитку планується отримати кінцевий p -ий показник:

$$S^{(p)} = \{ S^{(p)}_1, \dots, S^{(p)}_z, \dots, S^{(p)}_r \}, \quad (3.1.3)$$

Зміни стану показника в процесі його розвитку на етапах $0, 1, \dots, i, \dots, p$ характеризується матрицею стану:

$$S = \begin{vmatrix} S^{(0)}_1 & \dots & S^{(0)}_z & \dots & S^{(0)}_r \\ S^{(1)}_1 & \dots & S^{(1)}_z & \dots & S^{(1)}_r \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ S^{(i)}_1 & \dots & S^{(i)}_z & \dots & S^{(i)}_r \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ S^{(p)}_1 & \dots & S^{(p)}_z & \dots & S^{(p)}_r \end{vmatrix} \quad (3.1.4)$$

Зміна стану показника на кожному i -тому етапі:

$$\Pi^{(i)}, \quad (3.1.5)$$

Перехід показника із поточного стану в процесі розвитку до кінцевого стану характеризується формулою:

$$\Pi = \{\Pi^{(1)}, \dots, \Pi^{(i)}, \dots, \Pi^{(p)}\}, \quad (3.1.6)$$

Показники поточного стану та розвитку систем питного водопостачання та водовідведення охоплюють як єдиний комплекс: джерела питного водопостачання або водовідведення, системи і приєднаних до них споживачів.

Підставою формування актуалізованих показників $\Pi^{(i)}_a$ являються елементарні показники x_{1j} , x_{2j} , x_{3j} із множини:

$$X = X_1 \cup X_2 \cup X_3, \quad (3.1.7)$$

де $x_{1j} \in X_1$ – елементарний j -ий показник з множини елементарних показників джерела питного водопостачання або водовідведення X_1 ,

$x_{2j} \in X_2$ – елементарний j -ий показник з множини елементарних показників систем питного водопостачання або водовідведення X_2 ,

$x_{3j} \in X_3$ – елементарний j -ий показник з множини елементарних показників приєднаних до систем питного водопостачання або водовідведення споживачів X_3 .

У відповідності до розглянутого логіко – математичного формулювання концептуальної моделі процес формування показників поточного стану та розвитку систем питного водопостачання та водовідведення починається з нульового показника, продовжується p циклами трансформації його розвитку. На початковому етапі формується множина елементарних показників X . Кожен i -ий цикл включає оцінку проміжного стану показника $S^{(i)}$, формування показника $\Pi^{(i)}$ на підставі множини елементарних показників $X = X_1 \cup X_2 \cup X_3$ з використанням процедур розробки вибору показника ПРВП і його досягнення до кінцевого значення $S^{(i+1)}$, а

також з використанням комплексних балансів КБ, діаграм причинно – наслідкових зв'язків ДПНЗ, моделей показника МП.

З метою визначення факторів впливу та обмежень необхідно врахувати: зовнішні фактори впливу F , критерії вибору показника A , обмеження під час вибору показника L та параметри показника M .

Процес формування показників поточного стану та розвитку систем питного водопостачання та водовідведення є циклічним і базується на переході від одного стану системи до іншого через розробку та впровадження конкретних показників розвитку на кожному етапі.

Для забезпечення ефективного управління системами питного водопостачання та водовідведення необхідно здійснювати оцінку їх функціонування на основі цілісної системи показників, що охоплює різні аспекти їхньої діяльності. Така систематизація дозволяє здійснювати порівняльний аналіз, ідентифікувати проблемні зони, приймати обґрунтовані управлінські рішення щодо підвищення ефективності та стійкості функціонування систем.

Показники доцільно групувати за п'ятьма основними напрямками: технічними, економічними, екологічними, соціальними, а також показниками стійкості.

Так, технічні показники відображають рівень технічного стану, надійність та ефективність роботи інфраструктурних елементів системи.

Економічні показники характеризують фінансову ефективність, витрати та рентабельність діяльності підприємств питного водопостачання та водовідведення.

Екологічні показники відображають рівень впливу систем на навколишнє природне середовище та ефективність заходів з його мінімізації.

Соціальні показники пов'язані із задоволенням потреб населення, доступністю послуг та якістю обслуговування.

Показники стійкості функціонування системи дають змогу оцінити здатність систем витримувати зовнішні та внутрішні навантаження без втрати функціональності.

Таке групування дозволяє сформувати багатовимірну модель оцінки ефективності та стійкості функціонування систем питного водопостачання та

водовідведення, яка може слугувати основою для прийняття стратегічних управлінських рішень, розробки схем оптимізації та інвестиційних програм, підвищення екологічної безпеки та соціальної орієнтованості питного водопостачання та водовідведення.

У Таблиці 3.1.1 показано інтеграцію показників поточного стану та розвитку систем питного водопостачання та водовідведення.

Таблиця 3.1.1

Інтегрована таблиця показників поточного стану та розвитку систем питного водопостачання та водовідведення

Показник	Формула	Примітка
1	2	3
Рівень охоплення послугами централізованого водопостачання	$\delta_{\text{охопл}} = \frac{N_{\text{посл}}}{N} \cdot 100\%,$ де: $N_{\text{посл}}$ - кількість споживачів, яким надаються послуги з централізованого водопостачання, тис. осіб; N - загальна кількість споживачів у населеному пункті (об'єднаній територіальній громаді), тис. спож.	Охоплення населення централізованим водопостачанням
Питоме питне водоспоживання	$q = \frac{Q_{\text{р спож}}}{365 N_{\text{посл}}},$ де: $Q_{\text{р спож}}$ - об'єм питної води, реалізованої споживачам, тис. м ³ /рік; 365 - кількість днів у році; $N_{\text{посл}}$ - кількість споживачів, яким надаються послуги з централізованого водопостачання, тис. спож.	Середнє споживання на одного споживача
Кількість відхилень якості питної води від чинних нормативних вимог за мікробіологічними показниками	$\delta_{\text{відх м/б}} = \frac{P_{\text{відх}}}{P_{\text{заг}}},$ де: $P_{\text{відх}}$ - кількість проб з відхиленнями від нормативів за мікробіологічними показниками; $P_{\text{заг}}$ - загальна кількість проб за рік.	Проби питної води, що не відповідають вимогам ДСанПіН 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» за мікробіологічними показниками
Питомий час припинення надання послуг з централізованого водопостачання	$A_{\text{в}} = \frac{\sum (N_{\text{відкл і}} \cdot t_{\text{відкл і}})}{N_{\text{посл}}},$ де: $N_{\text{відкл і}}$ - кількість споживачів, яким було припинено надання послуг з централізованого водопостачання внаслідок і-тої аварії, тис. спож.; $t_{\text{відкл і}}$ - час, протягом якого послуги з централізованого водопостачання не надавалися, при аварійній ситуації, год.;	Середній час відключення питної води на одного споживача

	Нпосл - кількість споживачів, яким надаються послуги з централізованого водопостачання, тис. спож.	
Середній термін експлуатації систем централізованого водопостачання	$t_{\text{експл}} = \frac{\sum T_i \cdot \text{ПВ}_i}{\sum \text{ПВ}_i},$ де: T_i – термін експлуатації, різниця між звітним роком та роком введення в експлуатацію i-го елемента систем централізованого водопостачання, рік; ПВ_i - початкова вартість i-го елемента, тис. грн.	Довготривалість використання систем централізованого водопостачання
Відсоток зносу систем централізованого водопостачання	$t_{\text{зн}} = \frac{\sum \text{Зн}_i}{\sum \text{ПВ}_i} \cdot 100\%,$ де: Зн_i - сума зносу, нарахована на i-тий елемент за весь період експлуатації, тис. грн.; ПВ_i - початкова вартість i-го елемента, тис. грн.	Свідчить про технічний стан мереж централізованого водопостачання
Питома залишкова вартість систем централізованого водопостачання	$Z_v = \frac{Z_{\text{взаг}}}{N_{\text{посл}}},$ де: $Z_{\text{взаг}}$ - загальна залишкова вартість систем централізованого водопостачання на початок звітного року, тис. грн.; $N_{\text{посл}}$ - кількість споживачів, яким надаються послуги з централізованого водопостачання, тис. спож.	Середня залишкова вартість систем централізованого водопостачання на одного споживача
Лінійний показник аварійності централізованого водопостачання	$A_{\text{л}} = \frac{A_{\text{мер}}}{L},$ де: $A_{\text{мер}}$ - кількість аварій на розподільних мережах централізованого водопостачання за рік; L - загальна протяжність розподільних мереж централізованого водопостачання, км.	Кількість аварій на кілометр мережі централізованого водопостачання
Рівень подачі питної води	$\delta_{\text{под}} = \frac{Q_{\text{под}}}{Q_{\text{заб}}} \cdot 100\%,$ де: $Q_{\text{под}}$ - загальний об'єм питної води, поданої до розподільної системи централізованого водопостачання, тис. м³/рік; $Q_{\text{заб}}$ - об'єм забраної питної води, тис. м³/рік. При використанні у системі централізованого водопостачання підземної води без «розриву струменя» $Q_{\text{под}} = Q_{\text{заб}}$ та $\delta_{\text{под}} = 100\%$.	Ефективність використання забраної води
Лінійний показник втрат питної води	$B_{\text{т}} = \frac{(Q_{\text{под}} - Q_{\text{р}})}{L},$ де: $Q_{\text{под}}$ - загальний об'єм питної води, поданої до розподільної системи централізованого водопостачання, тис. м³/рік; $Q_{\text{р}}$ - загальний об'єм реалізованої питної води, тис. м³/рік; L - загальна протяжність розподільних мереж централізованого водопостачання, км.	Втрати на одиницю довжини мережі
Рівень обліку питної води	$\delta_{\text{под}} = \frac{Q_{\text{ліч}}}{Q_{\text{р}}} \cdot 100\%,$ де: $Q_{\text{ліч}}$ - об'єм питної води, реалізованої за показниками лічильника, тис. м³/рік; $Q_{\text{р}}$ - загальний об'єм реалізованої питної води, тис. м³/рік.	Ефективність реалізації питної води

Рівень оплати послуг з централізованого водопостачання	$\delta_{\text{спл}} = \frac{P_{\text{спл спож}}}{P_{\text{спож}}} \cdot 100\%,$ де: $P_{\text{спл спож}}$ - загальна оплата послуг з централізованого водопостачання споживачами, тис. грн./рік; $P_{\text{спож}}$ - загальна вартість виставлених споживачам рахунків, тис. грн./рік.	Частка оплати спожитих послуг з централізованого водопостачання
Питоме централізоване водовідведення	$q = \frac{Q_{\text{р спож}}}{365 N_{\text{посл}}},$ де: $Q_{\text{р спож}}$ - об'єм зібраних стічних вод від споживачів, тис.м³/рік; 365 - кількість днів у році; $N_{\text{посл}}$ - кількість осіб, яким надаються послуги з централізованого водовідведення, тис. осіб.	Оцінка обсягу стічних вод, що утворюються на одного мешканця
Рівень охоплення послугами централізованого водовідведення	$\delta_{\text{охопл}} = \frac{N_{\text{посл}}}{N} \cdot 100\%,$ де: $N_{\text{посл}}$ - кількість осіб, яким надаються послуги з централізованого водовідведення, тис. осіб; N - загальна кількість населення у населеному пункті (об'єднаній територіальній громаді), тис. осіб.	Частка населення, що користується централізованим водовідведенням
Питомий час перебоїв надання послуг централізованого водовідведення	$A_{\text{в}} = \frac{\sum (N_{\text{відкл і}} \cdot t_{\text{відкл і}})}{N_{\text{посл}}},$ де: $N_{\text{відкл і}}$ - кількість осіб, яким було припинено надання послуг з централізованого водовідведення внаслідок і-тої аварії, тис. осіб; $t_{\text{відкл і}}$ - час, протягом якого послуги з централізованого водовідведення не надавалися, при аварійній ситуації, год; $N_{\text{посл}}$ - кількість осіб, яким надаються послуги з централізованого водовідведення, тис. осіб.	Середній час припинення відкачування стоків на одного споживача
Середній термін експлуатації системи централізованого водовідведення	$t_{\text{експл}} = \frac{\sum T_i \cdot \text{ПВ}_i}{\sum \text{ПВ}_i},$ де: T_i - термін експлуатації, різниця між звітним роком та роком введення в експлуатацію і-го елемента системи централізованого водовідведення, рік; ПВ_i - початкова вартість і-го елемента, тис. грн.	Довготривалість використання систем централізованого водовідведення
Відсоток зносу системи централізованого водовідведення	$t_{\text{зн}} = \frac{\sum Z_{\text{ні}}}{\sum \text{ПВ}_i} \cdot 100\%,$ де: $Z_{\text{ні}}$ - сума зносу, нарахована на і-тий елемент за весь період експлуатації, тис. грн.; ПВ_i - початкова вартість і-го елемента, тис. грн.	Свідчить про технічний стан мереж централізованого водовідведення
Питома залишкова вартість системи централізованого водовідведення	$Z_{\text{в}} = \frac{Z_{\text{в заг}}}{N_{\text{посл}}},$ де: $Z_{\text{в заг}}$ - загальна залишкова вартість системи централізованого водовідведення на початок звітного року, тис. грн.; $N_{\text{посл}}$ - кількість споживачів, яким надаються послуги з централізованого водовідведення, тис. осіб.	Середня залишкова вартість систем централізованого водовідведення на одного споживача
Лінійний показник аварійності централізованого водовідведення	$A_{\text{л}} = \frac{A_{\text{мер}}}{L},$	Кількість аварій на кілометр мережі централізованого водовідведення

	де: Амер - кількість аварій на розподільних мережах централізованого водовідведення за рік; L - загальна протяжність розподільних мереж централізованого водовідведення, км.	
Рівень обліку стоків	$\delta_{\text{под}} = \frac{Q_{\text{ліч}}}{Q_{\text{р}}} \cdot 100\%$, де: Qліч - об'єм стоків за лічильниками, тис. м³/рік; Qр - загальний об'єм стоків, тис. м³/рік.	Ефективність відкачування стоків
Рівень оплати послуг централізованого водовідведення	$\delta_{\text{спл}} = \frac{P_{\text{спл спож}}}{P_{\text{спож}}} \cdot 100\%$, де: Рспл спож - загальна оплата послуг споживачами, тис. грн./рік; Рспож - загальна вартість виставлених споживачам рахунків, тис. грн./рік.	Частка оплати спожитих послуг з централізованого водовідведення
Коефіцієнт повторного використання очищених стоків	$K_{\text{повт}} = \frac{Q_{\text{повт}}}{Q_{\text{оч}}} \cdot 100\%$, де: Qповт - об'єм повторно очищених стоків, тис. м³/рік; Qоч - очікуваний об'єм стоків, тис. м³/рік.	Оцінка обсягів очищеної води, використаної повторно
Частка державного фінансування	$F_{\text{держ}} = \frac{C_{\text{держ}}}{C_{\text{заг}}} \cdot 100\%$, де: Сдерж - фінансування за рахунок коштів Державного бюджету заходів з оптимізації систем питного водопостачання та водовідведення, тис. грн./рік; Сзаг - загальне фінансування заходів з оптимізації систем питного водопостачання та водовідведення, тис. грн./рік.	Показує роль держави у фінансуванні інфраструктури

Представлені у Таблиці 3.1.1 показники поточного стану та розвитку систем питного водопостачання та водовідведення можна використовувати як основу для аналізу стійкості систем питного водопостачання та водовідведення, а також для порівняння різних населених пунктів або періодів часу в рамках схеми оптимізації.

Одним із ключових аспектів є баланс між витратами на модернізацію та експлуатацію обладнання та досягненням сталого водокористування. Формування системи показників є інструментом для прийняття обґрунтованих управлінських рішень, оцінки ефективності запланованих заходів та контролю досягнення стратегічних цілей. Наприклад, високий лінійний показник втрат питної води сигналізує про необхідність модернізації мереж, а зменшення втрат води у водопровідних мережах через впровадження систем диспетчеризації, контролю тиску та заміну зношених труб призводить не лише до зниження витрат води, а й зменшує

обсяг стічних вод, що потребують очистки, тим самим знижуючи навантаження на каналізаційні очисні споруди.

Крім того, енергоефективність насосного обладнання прямо впливає як на собівартість подачі води, так і на обсяги шкідливих викидів в атмосферу внаслідок споживання електроенергії. Застосування частотного регулювання, автоматизованих систем управління та модернізація насосних агрегатів сприяють одночасному покращенню показників питного водопостачання та водовідведення.

Важливим є також вплив якості поданої води на склад стічних вод: зміна технологій водопідготовки може зменшити використання хімічних реагентів, що у свою чергу вплине на процеси біологічного очищення на станціях водовідведення. Отже, навіть точкові технологічні рішення в одному сегменті системи можуть мати суттєві наслідки в іншому.

Загалом, забезпечення стійкості та ефективності функціонування систем питного водопостачання та водовідведення вимагає розробки схем оптимізації, як інтегрованих стратегій управління, що базуються на аналізі взаємозалежностей ключових показників, прогнозуванні довгострокових результатів від впровадження окремих заходів та використанні інструментів цифрового моделювання для прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

Довготривале планування розвитку питного водопостачання та водовідведення передбачає нерозривний взаємозв'язок між діагностикою поточного стану системи, прогнозними показниками її розвитку та визначенням оптимального комплексу заходів, спрямованих на підвищення ефективності, надійності та стійкості.

Взаємозв'язок між показниками і заходами є двостороннім: з одного боку, саме діагностичні показники ініціюють потребу у вжитті певних заходів, з іншого – реалізація заходів безпосередньо впливає на зміну значень відповідних показників. Цей взаємозв'язок є основою для побудови адаптивної, ефективної та стійкої системи управління в сфері питного водопостачання та водовідведення.

Запропонований підхід, що базується на аналізі чинної нормативної бази, наукових розробках, концептуальному та математичному моделюванні, дозволяє систематизувати процес збору, обробки та інтерпретації даних.

Для систематизації впливу різних груп чинників на рівень основних показників функціонування систем питного водопостачання та водовідведення доцільно застосовувати метод діаграми причинно – наслідкових зв’язків (діаграму Ісікави). Це дозволяє виявити ключові напрями оптимізації, спрямовані на підвищення надійності, якості послуг та ефективності управління.

Нижче подано узагальнену діаграму Ісікави, де основною проблемою виступає низький рівень ефективності функціонування систем питного водопостачання та водовідведення, а гілки діаграми репрезентують головні групи факторів, що на неї впливають. Тобто, накреслений взаємозв’язок системи показників питного водопостачання та водовідведення із заходами їх оптимізації.

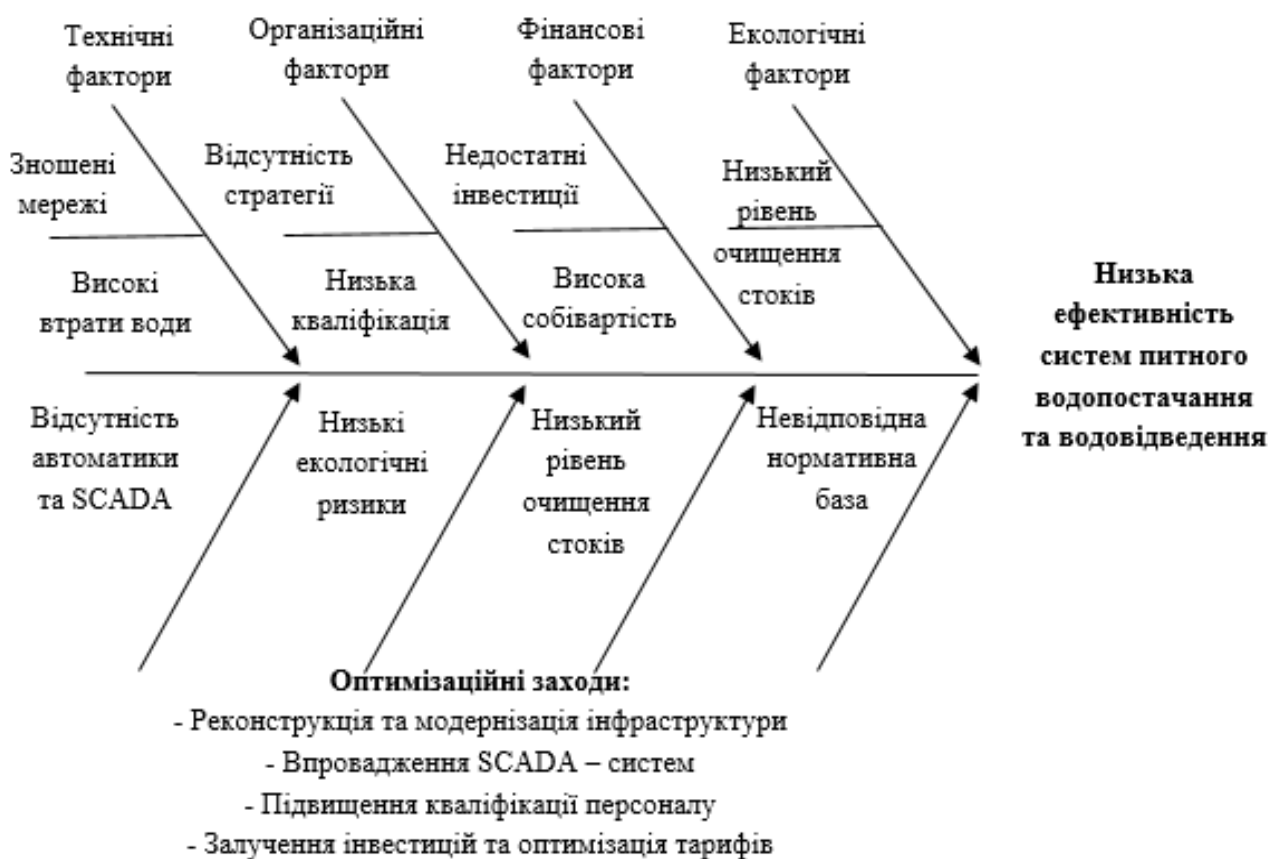


Рисунок 3.1.1. Взаємозв’язок системи показників питного водопостачання та водовідведення із заходами їх оптимізації

З метою обрання доцільних заходів довготривалого планування розвитку питного водопостачання та водовідведення запровадимо коефіцієнт стійкості

системи $R(S)$.

На відміну від існуючих методик бенчмаркінгу, пропоную синтетичний показник – інтегральний коефіцієнт стійкості (R_s), який відображає здатність системи зберігати функціональність при зовнішніх впливах. Для кожного блоку індикаторів розраховується частковий коефіцієнт стійкості:

$$R_s = w_1 \times K_{\text{tech}} + w_2 \times K_{\text{en}} + w_3 \times K_{\text{qual}} + w_4 \times K_{\text{org}}, \quad (3.1.8)$$

де:

K_{tech} – коефіцієнт технічної надійності (залежить від терміну експлуатації та аварійності);

K_{en} – індекс енергетичної автономності (наявність генераторів, «насосів блекауту»);

K_{qual} – бар'єрний коефіцієнт (здатність технологічної схеми протидіяти забрудненню);

w_i – вагові коефіцієнти, визначені за допомогою методу аналізу ієрархій.

Розроблена система індикаторів покладена в основу алгоритму проведення аудиту систем питного водопостачання та водовідведення, що передбачений Порядками.

Таким чином можна зробити наступні висновки.

1. Індикатор енергоефективності є визначальним під час вибору між централізованою та гібридною схемами питного водопостачання та водовідведення.

2. Рівень ХБРЯ – захищеності (через коефіцієнт K_{qual}) диктує необхідність включення до схеми оптимізації розділів щодо сорбційного очищення (ПАВ) та УФ – знезараження.

3. Динаміка зміни показника стійкості слугує критерієм ефективності запроваджуваних заходів. Якщо реалізація заходу не призводить до зростання R_s на розраховану величину, такий захід вважається недоцільним.

3.2. Розроблення методичного підходу до формування та аналізу альтернативних сценаріїв розвитку

Стратегічне планування розвитку громад повинно базуватися на багатоваріантному аналізі. В межах даного дослідження розроблено методичний підхід, який трансформує процедуру формування сценаріїв із суто технічного переліку заходів у багатокритеріальний процес пошуку оптимального рівня стійкості інфраструктури.

Методичний підхід передбачає реалізацію п'яти наступних послідовних етапів.

1. Діагностично – аудиторський етап представляє собою збір вихідних даних через цифровізацію об'єктів у ГІС та оцінку поточного стану за системою індикаторів (див. підрозділ 3.1).

2. Під час генерації альтернатив формуються сценарії, що принципово відрізняються за рівнем технологічної трансформації та капіталомісткості.

3. Гідравлічна та безпекова верифікація - це перевірка технічної реалістичності кожного сценарію за допомогою гідравлічного моделювання (EPANET/QGIS) та симуляції ХБРЯ-загроз.

4. Багатокритеріальне оцінювання здійснюється за розрахунок інтегрального індексу стійкості $R(S)$ для кожного сценарію.

5. Рішення приймається шляхом вибору оптимального сценарію за критерієм максимального приросту стійкості на одиницю інвестицій.

Запропонована послідовність етапів має циклічний характер, що дозволяє коригувати вихідні параметри сценаріїв у разі виявлення локальних дефіцитів вільного напору або критичних ризиків під час гідродинамічних симуляцій. Такий підхід повністю корелює з вимогами державних Порядків, оскільки трансформує процес планування з лінійного кошторисного проектування у гнучку систему багатокритеріального аналізу. Обґрунтована ієрархічна структура взаємозв'язків між блоками аудиту, розрахунковим ядром та інвестиційним вибором відображає концептуальну схему прийняття рішень у межах розробленого алгоритму.

Алгоритм формування та аналізу альтернативних сценаріїв розвитку систем питного водопостачання та водовідведення представлений нижче на Рисунку 3.2.1.

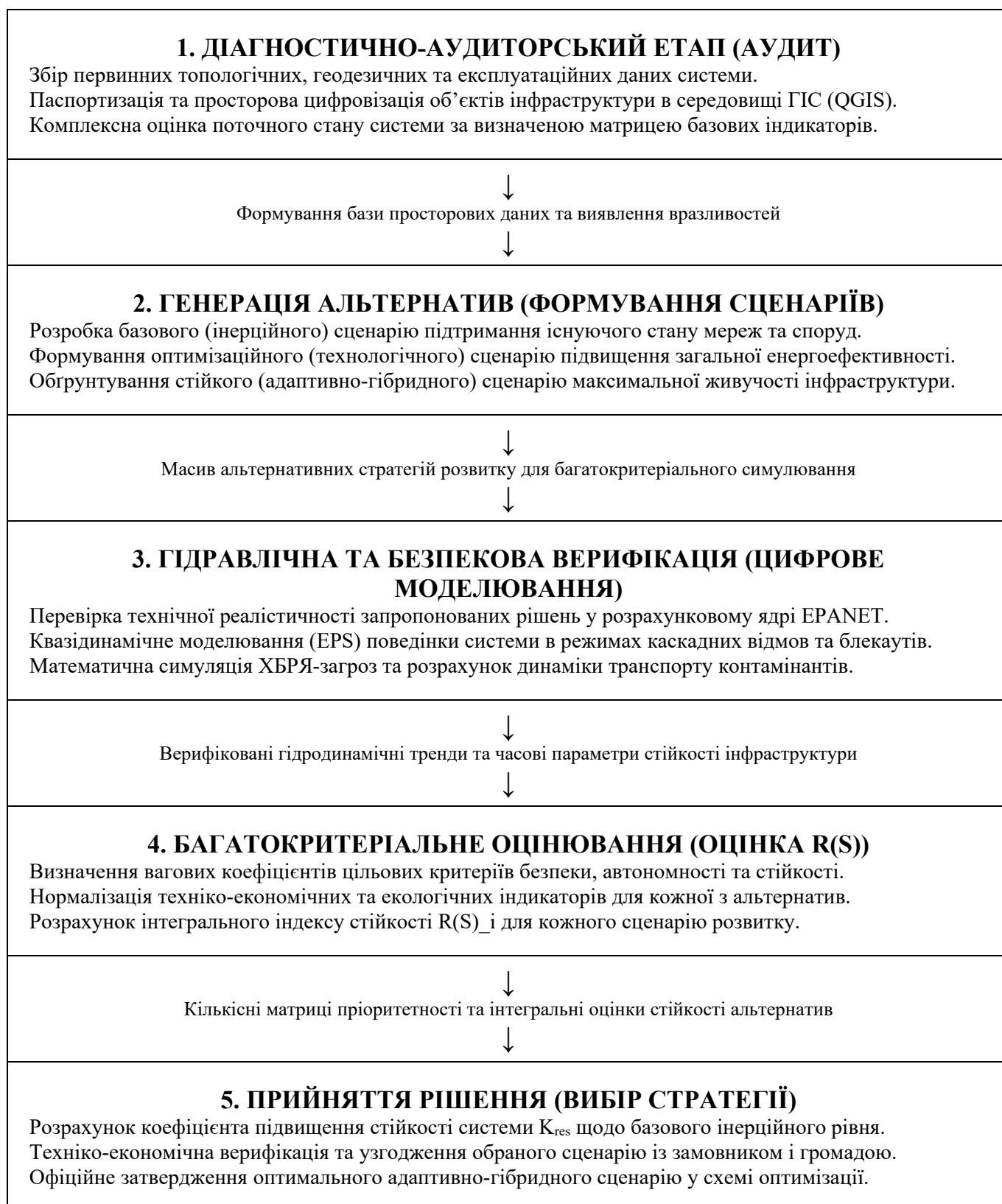


Рисунок 3.2.1. Алгоритм формування та аналізу альтернативних сценаріїв розвитку систем питного водопостачання та водовідведення

Згідно з нормативними вимогами та враховуючи специфіку стійкості, доцільно

виділяти три базові типи сценарії, які представлені у Таблиці 3.2.1.

Таблиця 3.2.1

Характеристика альтернативних сценаріїв розвитку систем питного водопостачання та водовідведення

Тип сценарію	Вектор розвитку	Основні заходи	Вплив на стійкість
Базовий (інерційний)	Підтримання поточного стану.	Капітальний ремонт аварійних ділянок мереж, заміна насосів на ідентичні.	Мінімальний. Система залишається вразливою до блекаутів та забруднень.
Оптимізаційний (технологічний)	Підвищення ефективності.	Модернізація очисних споруд, заміна газоподібного хлору на гіпохлорит натрію, впровадження ЧРП.	Середній. Підвищується енергоефективність та реагентна безпека.
Стійкий (адаптивно-гібридний)	Максимальна живучість	Впровадження «насосів блекауту», децентралізованих вузлів доочищення, ГІС-моніторингу та автономного живлення.	Максимальний. Система здатна функціонувати в умовах каскадних відмов.

Для аналізу обраних сценаріїв у роботі застосовано метод аналізу ієрархій та логіко – математичне моделювання. Кожен сценарій проходить верифікацію за системою критеріїв, визначених у Порядках.

1. Техніко–економічна ефективність – оцінка строку окупності та питомих витрат.

2. Гідравлічна стабільність – перевірка сценарію на цифровій моделі (EPANET/QGIS) на відповідність нормативним напорам та витратам.

3. Ризик – орієнтований критерій – оцінка здатності сценарію нівелювати загрози, визначені у Матриці ризиків.

Кінцевим етапом методичного підходу є обрання оптимального сценарію на основі порівняння динаміки коефіцієнта стійкості. Авторська модель оцінки базується на розрахунку інтегрального показника для кожного сценарію розвитку:

$$R(S)_i = \sum_{j=1}^n w_j \times E_{ij}, \quad (3.2.1)$$

де:

$R(S)_i$ – показник стійкості i -го сценарію;

w_j – вага j -го критерію (енергонезалежність, якість води, надійність мереж), визначена експертним шляхом;

E_{ij} – нормалізована оцінка ефективності i -го сценарію за j -м критерієм.

Для кількісного обґрунтування переваг обраного технічного рішення вводиться коефіцієнт підвищення стійкості (K_{res}):

$$K_{res} = \frac{R(S)_{opt}}{R(S)_{base}}, \quad (3.2.2)$$

де:

$R(S)_{opt}$ – інтегральна стійкість системи після реалізації оптимального сценарію;

$R(S)_{base}$ – базовий рівень стійкості системи до модернізації.

Запропонований методичний підхід дозволяє обґрунтувати вибір сценарію розвитку не лише за економічними показниками, а й за критерієм гарантованої безпеки питного водопостачання та водовідведення. Доведено, що сценарії, які включають цифровізацію (ГІС) та децентралізацію критичних вузлів, забезпечують значення $K_{res} > 1,3$, що свідчить про суттєве підвищення адаптивної спроможності системи в умовах воєнного стану та надзвичайних ситуацій.

Під час порівняння сценаріїв обов'язковим є врахування імовірнісних втрат. Для оцінювання сценаріїв за критерієм безпеки використовується матриця домінування

критеріїв.

Таблиця 3.2.2

Матриця порівняльної оцінки сценаріїв за критеріями стійкості (приклад для міста Дніпро)

Критерії оцінки	Вага (w_j)	Сценарій 1 (Базовий)	Сценарій 2 (Оптим.)	Сценарій 3 (Стійкий)
Енергетична автономність	0,35	0,1	0,5	0,9
Техногенна безпека (ХБРЯ)	0,25	0,2	0,7	0,8
Мінімізація втрат ресурсів	0,20	0,3	0,6	0,7
Швидкість відновлення (T_{rec})	0,20	0,2	0,4	0,9
Інтегральний показник $R(S)$	1,00	0,18	0,57	0,84

З наведеного прикладу видно, що Сценарій 3 («Стійкий») забезпечує найвищий рівень інтегральної стійкості. Коефіцієнт K_{res} для нього становить $0,84 / 0,18 = 4,66$, що математично доводить доцільність переходу до адаптивно – гібридної архітектури системи.

Таким чином, розроблений методичний підхід дозволяє громадам обґрунтовано підходити до вибору стратегії розвитку. Головною перевагою підходу є інтеграція гідравлічного моделювання безпосередньо у процес вибору сценарію. Тобто, кожен технічний захід оцінюється за його внеском у загальний показник стійкості. Це забезпечує прозорість прийняття рішень та створює наукове підґрунтя для залучення

міжнародного фінансування під проєкти, що гарантують безпеку питного водопостачання та водовідведення у кризові періоди.

3.3. Методологія аналізу, оцінки та управління ризиками у сфері питного водопостачання та водовідведення

Перехід до стратегії забезпечення енергетичної сталості та енергоефективності систем питного водопостачання та водовідведення у кризових ситуаціях потребує розроблення цілісної методології управління ризиками. В межах даного дослідження розроблено багаторівневий підхід до аналізу та оцінки ризиків, який базується на інтеграції децентралізованих технологій та ризик – орієнтованому плануванні.

Для ідентифікації та ранжування загроз автором розроблено багатокритеріальну матрицю, яка є інструментом процедури аудиту, визначеної у Порядках. На відміну від стандартних підходів, запропонована матриця враховує специфічні військові та енергетичні виклики.

В межах розробленого підходу запропоновано дворівневу класифікацію ризиків, яка розділяє їх на загальноексплуатаційні (деградація мереж, кавітація, гідродари) та екстремальні (кризові) ризики воєнного часу. Основні кризові деструктивні впливи наступні.

1. Енергетичний колапс (блекаут) – повне або тривале знеструмлення головних водопровідних насосних станцій (ВНС) та каналізаційних очисних споруд (КОС), що призводить до гідродинамічного вакууму, спорожнення резервуарів чистої води (РЧВ) та виникнення застійних зон.

2. Фізико – кінетичне руйнування – пряме пошкодження магістральних водоводів, споруд водозабору або гребель унаслідок бойових дій.

3. ХБРЯ – контамінація (хімічна, біологічна, радіаційна, ядерна загроза) – навмисне або техногенне забруднення поверхневих чи підземних джерел питного водопостачання, водовідведення високотоксичними сполуками.

Для формалізації процесу ідентифікації загроз у схемах оптимізації розроблено базову матрицю деструктивних чинників.

Таблиця 3.3.1

Матриця ідентифікації та первинного оцінювання ризиків систем питного водопостачання та водовідведення

Код ризику	Найменування деструктивної події	Технологічні наслідки для інфраструктури	Об'єкти критичного впливу
R_{ENG}	Системне відключення зовнішнього енергоживлення	Зупинка насосних агрегатів, падіння вільного напору до 0, ризик гідроудару при відновленні живлення	ВНС-II та III підйомів, повітродувні станції КОС
R_{KIN}	Механічне пошкодження конструкцій та лінійних тіл	Залпові втрати води, затоплення територій, порушення гідравлічної цілісності кільцевих мереж	Магістральні водоводи великих діаметрів, РЧВ
R_{CBRN}	Контамінація джерела водопостачання (ХБРЯ)	Прорив токсикантів крізь стандартні бар'єри очищення, загроза життю споживачів	Поверхневі водозабори, насосні станції
R_{TEC}	Хімічна аварія на території підприємства	Витік газоподібного хлору, зупинка процесу знезараження, евакуація персоналу	Хлораторні станції, склади зберігання реагентів

Для переходу від якісного опису до інженерних розрахунків автором адаптовано класичну концепцію оцінювання ризику через інтегральний індекс ризику (RI – Risk Index). Математична інтерпретація моделі має такий вигляд:

$$RI = P \cdot I \cdot V \quad (3.3.1)$$

де P – ймовірність (частота) виникнення деструктивної події (шкала від 1 до 5);

I – ступінь тяжкості технологічних та соціально – екологічних наслідків (шкала від 1 до 5);

V – коефіцієнт базової вразливості системи, що відображає ступінь зношеності або відсутність резервування елемента систем питного водопостачання та водовідведення (шкала від 1.0 до 2.0).

Рівень ризику класифікується за чотирма зонами:

$RI \leq 10$ – прийнятний (зелена зона) – поточний контроль;

$10 < RI \leq 25$ – помірний (жовта зона) – розроблення планових заходів;

$25 < RI \leq 40$ – суттєвий (помаранчева зона) – пріоритетне фінансування капітальних рішень;

$RI > 40$ – критичний (червона зона) – негайне реагування, експлуатація в аварійному режимі.

Управління ризиками здійснюється за замкненим контуром зворотного зв'язку, де кінцевою метою є мінімізація залишкового ризику (RI_{res}) до прийнятного рівня шляхом впровадження інженерних бар'єрів. Запропоновані технічні рішення для управління ризиками та оцінка їхнього впливу на резильєнтність систем наведені у Таблиці 3.3.2.

Таблиця 3.3.2

Матриця інженерних заходів з мінімізації ризиків та оцінка їх ефективності

Напрямок мінімізації	Впроваджуваний інженерний бар'єр	Вплив на параметри формули ризику	Технологічний ефект
Протидія R_{ENG}	Встановлення частотно-регульованих приводів (ЧРП) та дизель-генераторних станцій	Зниження коефіцієнта вразливості V та наслідків I	Запобігання гідроударам, забезпечення гарантованого мінімального тиску у мережі
Протидія R_{CBRN}	Впровадження мобільних станцій доочищення та систем дозування ПАВ (порошкоподібного активованого вугілля)	Радикальне зниження показника тяжкості наслідків I	Сорбційне затримання контамінантів, експрес-адаптація технологічної схеми очисних споруд
Протидія R_{KIN}	Створення DMA-зон (дискретних районів обліку) та встановлення автоматизованих засувок	Зменшення площі впливу події та показника наслідків I	Швидка автоматична локалізація та секціонування аварійної ділянки без зупинки всієї системи міста

Ефективність управління ризиками верифікується за допомогою динамічного

коефіцієнта зниження загрози (η_{risk}):

$$N_{risk} = \frac{RI_{base} - RI_{res}}{RI_{base}} \cdot 100\% \quad (3.3.2)$$

Згідно з вимогами розроблених Порядків, інвестиційний проєкт оптимізації системи вважається обґрунтованим, якщо впровадження превентивних заходів забезпечує значення $\eta_{risk} \geq 60\%$ для об'єктів червоної та помаранчевої зон.

Тобто, у цьому підрозділі розроблено та науково обґрунтовано методологію аналізу та оцінювання ризиків систем питного водопостачання та водовідведення у кризовий період, що базується на інтеграції трифакторної моделі (P, I, V) у структуру схем оптимізації муніципальних систем.

Сформовано шкалу класифікації інфраструктурних ризиків із чітким розподілом на чотири зони безпеки, що дозволяє громадам здійснювати ранжування інвестиційних заходів за критерієм найбільшої загрози.

Доведено, що впровадження цільових інженерних бар'єрів (зокрема систем частотного регулювання, секціонування та реагентних комплексів введення ПАВ) забезпечує нормативний рівень зниження загрози ($\eta_{risk} \geq 60\%$), що є базовим критерієм для верифікації ефективності проєктів відновлення критичної інфраструктури.

3.4. Гідравлічне моделювання та геопросторовий аналіз як інструменти обґрунтування технічних рішень

В умовах посилення безпекових викликів та необхідності модернізації критичної інфраструктури, обґрунтування технічних рішень у схемах оптимізації систем питного водопостачання та водовідведення вимагає переходу від статичних методів розрахунку до динамічного моделювання. В межах даного дослідження доведено, що поєднання геоінформаційних систем (ГІС) та гідравлічного моделювання (ГМ) є базовим інструментом для реалізації ризик – орієнтованого підходу, закріпленого у Порядках.

Згідно з вимогами щодо цифровізації даних, першочерговим етапом обґрунтування рішень є створення геопросторової моделі системи. ГІС – платформа повинна забезпечувати не лише візуалізацію мереж, а й аналітичну обробку атрибутивних даних. Тобто, є необхідність у формуванні цифрового реєстру із зазначенням матеріалу, терміну експлуатації та гідравлічної шорсткості трубопроводів. Також необхідна ідентифікація критичних вузлів та магістралей, вихід з ладу яких призводить до масштабних перебоїв у питному водопостачанні та водовідведенні, що є необхідним для формування схем оптимізації та планів стійкості.

Необхідність імплементації вимог щодо обов'язкового створення цифрових гідравлічних моделей у нормативні Порядки зумовлена низкою наступних фундаментальних науково-технічних та безпекових чинників.

1. Трансформація режиму водоспоживання.

Внаслідок міграційних процесів, руйнування промислових підприємств та зміни демографічної ситуації міст відбулося критичне розбалансування систем. Реальні витрати води часто у кілька разів нижчі за проєктні, що призводить до збільшення часу перебування води в трубопроводах, вторинного забруднення та перевитрат електроенергії через роботу насосів поза зоною оптимального ККД. Статичні розрахунки не здатні адекватно описати ці процеси.

2. Симуляція каскадних відмов в умовах воєнного стану.

Тільки за допомогою квазідинамічного моделювання можливо заздалегідь прорахувати сценарії повної або часткової зупинки підкачувальних насосних станцій (ПНС), критичного зниження тиску, виникнення зон кавітації або гідроударів під час раптового відновлення енергоживлення.

3. Управління ризиками ХБРЯ – загроз (хімічних, біологічних, радіаційних, ядерних).

Забезпечення національної безпеки у сфері питного водопостачання та водовідведення вимагає наявності інструменту, що дозволяє в реальному часі розрахувати траєкторію, швидкість та концентрацію розповсюдження контамінантів усередині складної замкненої кільцевої мережі з метою миттєвого визначення точок

локалізації та відсікання уражених ділянок.

Впровадження цих вимог дозволяє формалізувати критерії оцінки технічних рішень. Математично ефективність застосування інструментів просторового аналізу та моделювання виражається через інтегральний коефіцієнт підвищення стійкості системи (K_{res}):

$$K_{res} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{mod}(S_i) \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n P_{base}(S_i) \cdot \Delta t_i} \quad (3.4.1)$$

де:

$P_{base}(S_i)$ – ймовірність збереження функціональної спроможності системи за базового (інтуїтивно–досвідного) підходу до ліквідації аварійного сценарію S_i ;

$P_{mod}(S_i)$ – ймовірність збереження стабільного функціонування (або мінімізації збитків) за умови реалізації технічних рішень, попередньо верифікованих на базі гідравлічної моделі;

Δt_i – тривалість дії i -го екстремального чинника чи сценарію обмеження.

Інструментальну основу практичної реалізації Порядків складає інтеграція геоінформаційних систем (ГІС, на базі платформи QGIS) та розрахункових гідравлічних комплексів (EPANET). Просторовий аналіз у середовищі ГІС дозволяє накопичувати, структурувати та візуалізувати топологічні та експлуатаційні дані, що виступають основою для формування «цифрового двійника».

Просторовий аналіз у середовищі ГІС дозволяє накопичувати, структурувати та візуалізувати топологічні та експлуатаційні дані, що виступають основою для формування «цифрового двійника». Наступний експорт цих геокодованих масивів у розрахункове ядро EPANET забезпечує перехід до автоматизованого виконання серій багатоваріантних гідродинамічних та масообмінних симуляцій. Таким чином, інтегрований інструментарій QGIS – EPANET трансформується з прикладного засобу візуалізації в безальтернативну платформу інженерного аудиту, яка дозволяє обґрунтовувати параметри запірної – регулюючої арматури, оптимізувати режими роботи насосних станцій та гарантувати технологічну безпеку громад у кризових

ситуаціях.

Таблиця 3.4.1

Структура вихідних даних геопросторового аналізу для формування розрахункового графа мережі

Категорія просторових даних	Векторні атрибутивні параметри в ГІС	Технологічне значення для гідравлічної моделі	Джерело інформації та верифікації
Вузлові елементи	Географічні координати (X, Y), геодезична відмітка поверхні землі (Z), тип вузла (споживач, резервуар, джерело)	Визначення потенційної енергії потоку, розрахунок вільного тиску у споживачів	Топографічні плани, виконавче знімання, GPS-паспортизація
Лінійні об'єкти	Довжина (L), внутрішній діаметр (D _c), матеріал, еквівалентна шорсткість (k _c), рік укладання, індекс аварійності	Розрахунок лінійних втрат напору по довжині, оцінка пропускної спроможності	Технічні звіти, акти шурфування, Книги обліку аварій
Регулюючі об'єкти	Координати прив'язки, марка обладнання, робочі Q-H характеристики, схеми автоматизації	Моделювання законів граничного керування, дроселювання, функціонування зворотних клапанів	Паспорти насосів, дані SCADA, регламенти технологічних служб
Просторові навантаження	Зони щільності забудови, питомі норми водоспоживання, геоприв'язка лічильників	Дискретизація вузлового відбору води, формування графіків нерівномірності	Абонентські бази даних підприємства

Просторовий аналіз дозволяє виявити кореляційні зв'язки між терміном експлуатації трубопроводів, їхнім матеріалом та питомою аварійністю, формуючи карту пріоритетності капітальних інвестицій.

Для моделювання напірного руху води в мережах водопостачання використовується система диференціальних та алгебраїчних рівнянь, що описують баланс витрат у вузлах (закон збереження маси) та баланс втрат напору в замкнених контурах (закон збереження енергії).

Втрати напору на ділянці трубопроводу h_f визначаються за фундаментальною

формулою Дарсі – Вейсбаха або Хейзена – Вільямса. Для автоматизованих розрахунків у вітчизняній практиці, з урахуванням вимог розроблених Порядків щодо типізації зношених чавунних та сталевих мереж, адаптовано залежність:

$$h_f = 10.67 \cdot L \cdot C^{-1.852} \cdot D^{-4.87} \cdot Q^{1.852} \quad (3.4.2)$$

де:

Q – витрата води на ділянці, $\text{м}^3/\text{с}$;

C – коефіцієнт гладкості Хейзена – Вільямса (варіюється від 150 для нових пластикових труб до 60–80 для сильно зарослих чавунних магістралей).

Відповідно до нормативних вимог розробленого Додатка 3 Порядків, обов’язковим етапом є калібрування моделі на основі натурних вимірів. Процес валідації здійснюється за двома ключовими параметрами: гідродинамічним тиском та якісними показниками (концентрацією речовин).

$$E_p = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (H_{fact}^j - H_{mod}^j)^2} \leq \Delta H_{perm} \quad (3.4.3)$$

де:

H_{fact}^j та H_{mod}^j – відповідно фактичний (зафіксований манометром або датчиком SCADA) та розрахований моделлю напори у j -й контрольній точці;

m – кількість контрольних точок;

ΔH_{perm} – гранично допустима похибка калібрування, яка згідно з Порядками не повинна перевищувати 10% від величини вимірюваного тиску (або ± 1.5 – 2.0 м вод. ст. для розподільних мереж). Для моделювання показників якості води (наприклад, залишкового хлору) точність збігу динамічних трендів повинна становити не менше 90% ($\leq 10\%$ відхилення).

Головною науково – практичною цінністю впровадження окремого розділу з моделювання є обов’язковість проведення сценарних симуляцій екстремальних умов

воєнного часу. На відміну від комерційних програмних комплексів, що орієнтовані виключно на комерційну оптимізацію енергоспоживання, запропонований підхід на базі алгоритмів EPANET дозволяє вирішувати завдання адвективного перенесення речовин та кінетики хімічних реакцій безпосередньо у потоці води.

Математична модель поширення контамінантів (ХБРЯ – агентів) у трубопроводі базується на одновимірному рівнянні адвекції – дифузії:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = - \frac{4Q}{\pi D^2} \frac{\partial C_i}{\partial x} + \theta(C_i) \quad (3.4.4)$$

де:

C_i – концентрація речовини у створі x у момент часу t ;

$\theta(C_i)$ – функція швидкості хімічного розпаду або взаємодії речовини зі стінками труб (кінетика 1-го або 2-го порядку).

Завдяки цьому інструменту схема оптимізації збагачується превентивними технічними рішеннями, які детально розраховуються під час сценарного аналізу.

Під час сценарію «Блекаут» визначаються зони нульового та від’ємного тиску при відключенні головних насосних станцій, розрахунок часу спорожнення резервуарів чистої води (РЧВ) та обґрунтування точок підключення дизель-генераторних установок оптимальної потужності.

Під час сценарію «ХБРЯ – зараження вододжерела» розраховується час добігання токсичної речовини до перших споживачів. На основі розрахункових ізохрон поширення забруднення обґрунтовуються параметри систем автоматичного відсікання магістралей та точки введення адсорбційних реагентів – зокрема, дозування порошкоподібного активованого вугілля (П АВ) для сорбційного очищення.

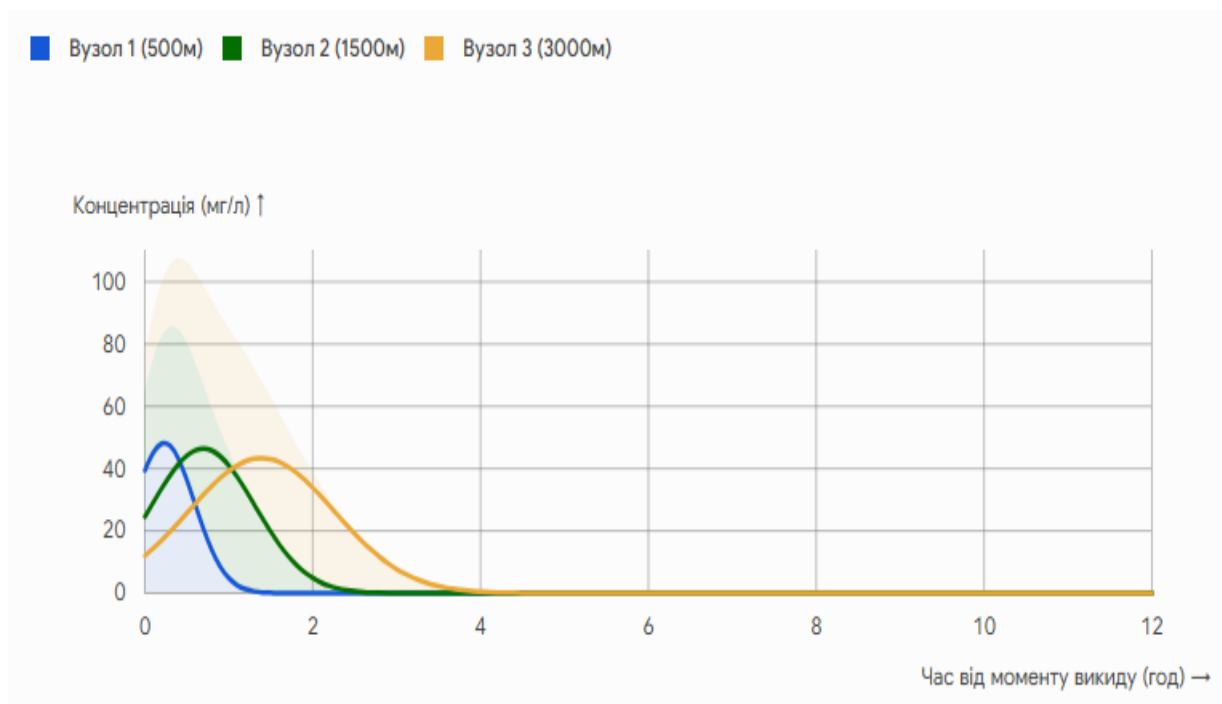


Рисунок 3.4.1. Графік динаміки зміни концентрації умовного контамінанту у дистальних вузлах розподільної мережі при залповому ХБРЯ-забрудненні (моделювання в середовищі EPANET)

На Рисунку 3.4.1 наочно відображено часовий бар'єр, що дає диспетчерській службі підприємства чітко регламентований час для перекриття запірної арматури та переходу на резервне водопостачання та водовідведення.

На Рисунку 3.4.1 наочно відображено часовий бар'єр, що дає диспетчерській службі підприємства чітко регламентований час для перекриття запірної арматури та переходу на резервне водопостачання та водовідведення. Отримані кінетичні криві дозволяють інтегрувати результати гідродинамічного симулятора безпосередньо у локальні плани реагування на надзвичайні ситуації та технологічні регламенти підприємств питного водопостачання та водовідведення. Завдяки такій верифікації, муніципальна схема оптимізації трансформується із пасивного містобудівного документа у проактивну автоматизовану систему підтримки прийняття рішень. Це забезпечує надійне превентивне управління інженерною безпекою громади, гарантуючи мінімізацію масштабів потенційного ураження населення за умов каскадного розвитку критичних загроз.



Рисунок 3.4.2. Геопросторова схема інтеграції ГІС QGIS та розрахункових модулів для ідентифікації зон критичного зниження вільного напору під час імітації аварійного виходу з ладу магістрального водоводу, колектора

Впровадження розробленої методологічної схеми моделювання дозволяє звести

інженерні рішення до чітких кількісних показників, що унеможлиблює суб'єктивізм під час формування інвестиційних програм відновлення територіальних громад.

Таблиця 3.4.2

Порівняльна матриця ефективності обґрунтування інженерних рішень у схемах оптимізації

Технічне завдання оптимізації	Традиційний (емпіричний) підхід	Запропонований ризик-орієнтований підхід (ГІС + ГМ)	Очікуваний технологічний та економічний ефект
Реконструкція зношених мереж	Заміна ділянок за фактом перевищення ліміту аварійності або строків амортизації	Визначення критичних ділянок через ГІС-аналіз у поєднанні з оцінкою втрат напору на моделі	Зменшення капітальних витрат на 20–25% за рахунок виключення з планів замін ділянок із достатнім гідравлічним резервом
Енерго-ефективність насосних станцій	Підбір насосів за максимальними паспортними значеннями з великим коефіцієнтом запасу	Експорт погодинних профілів тиску та витрат з моделі. Побудова суміщених характеристик «насос-мережа»	Зниження питомого споживання електроенергії на 15–30% завдяки інтеграції частотного регулювання під реальні режими
Цивільний захист та ХБРЯ-безпека	Відсутність інструментів прогнозування; реагування за фактом масового отруєння	Автоматичний розрахунок зон розповсюдження домішок, обґрунтування дислокації мобільних станцій очищення (введення ПАВ)	Мінімізація ризиків для життя населення; скорочення часу локалізації зараження до < 15-20 хвилин

Таким чином, інтеграція гідравлічного моделювання та ГІС – технологій у нормативне поле розроблення схем оптимізації створює наукове підґрунтя для переходу до превентивного управління критичною інфраструктурою. Використання зазначених інструментів дозволяє кількісно оцінити приріст стійкості системи при реалізації технічних рішень, що є ключовим фактором безпеки питного водопостачання та водовідведення в умовах воєнного стану та ХБРЯ – ризиків.

Застосування гідравлічного моделювання та геопросторового аналізу не є самоціллю, а виступає необхідною умовою для мінімізації вразливості систем. В межах розроблених Порядків вплив цих інструментів оцінюється через коефіцієнт підвищення стійкості (K_{res}), який відображає приріст живучості системи після імплементації рішень, обґрунтованих за допомогою цифрових моделей.

Гідравлічне моделювання дозволяє безпосередньо впливати на змінні у цільовій функції стійкості $R(S) \rightarrow \max$.

За допомогою ГІС-аналізу віку та матеріалу мереж у поєднанні з моделюванням тисків, обґрунтовуються зони встановлення регуляторів, що знижує аварійність. Це підвищує частковий коефіцієнт технічної стійкості на 15–20%.

Моделювання режимів роботи насосних станцій дозволяє підібрати обладнання для роботи в точці максимального ККД, що підвищує енергетичну витривалість системи в умовах дефіциту потужності.

Наявність цифрового двійника дозволяє диспетчерським службам миттєво визначати запірну арматуру, яку необхідно перекрити для локалізації аварії, що скорочує час простою системи на 40–60%.

Для обґрунтування технічних рішень у схемах оптимізації запропоновано формулу розрахунку ефективності цифрових інструментів:

$$K_{res} = \frac{R(S)_{mod}}{R(S)_{base}}, \quad (3.4.5)$$

де:

$R(S)_{base}$ – базовий рівень стійкості системи без використання динамічного моделювання (управління за фактом аварій);

$R(S)_{\text{mod}}$ – прогнозований рівень стійкості при впровадженні рішень, верифікованих на гідравлічній моделі.

Доведено, що інтеграція ГІС – технологій та гідравлічного моделювання перетворює системи питного водопостачання та водовідведення з «реактивної» (що реагує на наслідки) на «превентивну» (що керує ризиками). Це науково пояснює, чому у розроблених Порядках створення цифрових моделей визначено як обов’язковий етап. Без моделювання неможливо розрахувати індекс вразливості критичних споживачів. Без геопросторового аналізу неможливо оптимально розмістити децентралізовані вузли доочищення, які є «точками стійкості» при повному руйнуванні централізованих магістралей.

Впровадження інструментів гідравлічного моделювання та ГІС дозволяє досягти синергетичного ефекту, де інтегральний коефіцієнт стійкості системи зростає не лише за рахунок заміни труб, а за рахунок підвищення якості управлінських рішень та оперативного реагування на ХБРЯ – загрози та військові виклики. Це підтверджує доцільність нормативного закріплення цих вимог у Порядках як базового елемента державної політики у сфері критичної інфраструктури.

Таким чином, у цьому підрозділі науково обґрунтовано доцільність та безпекову необхідність виділення «Гідравлічного моделювання та геопросторового аналізу» в окремий самостійний розділ розроблених нормативних Порядків, що змінює парадигму проектування схем оптимізації в бік резильєнтності систем.

Сформовано методологічний комплекс поєднання ГІС – платформ (QGIS) та математичних розрахункових ядер (EPANET), який дозволяє створювати верифіковані «цифрові двійники» водопровідних систем із точністю калібрування за тиском та якістю води не нижче 90%.

Доведено, що використання динамічних моделей є єдиним математично обґрунтованим способом управління ХБРЯ – ризиками та каскадними відмовами в умовах енергетичного дефіциту. Воно забезпечує чітке просторово – часове визначення руху забруднюючих речовин та оптимізує режими роботи сорбційних бар’єрів (зокрема з використанням порошкоподібного активованого вугілля – ПАВ).

Запропонований підхід дозволяє перевести інвестиційне планування

муніципалітетів на рівень високої наукової та економічної верифікації, забезпечуючи підтверджене зниження енергоємності систем на 15–30% та оптимізацію капітальних витрат на реконструкцію трубопроводів до 25%.

3.5. Формування переліку та пріоритизація заходів в оптимальному сценарії

Процес формування оптимального сценарію розвитку систем централізованого водопостачання та водовідведення є завершальним етапом розроблення схем оптимізації, на якому теоретичні моделі та результати сценарного аналізу трансформуються у конкретний перелік технічних і організаційних заходів. Згідно з вимогами затверджених Порядків, формування переліку заходів базується на принципах «Відбудувати краще, ніж було», що передбачає не просто відновлення інфраструктури, а її якісну трансформацію для забезпечення стійкості.

Відповідно до розробленого методичного підходу, після узагальнення результатів порівняння сценаріїв формується таблиця заходів, які структуруються через побудову ієрархічної структури робіт (ICP). Заходи об'єднуються за напрямками та, за необхідності, деталізуються на конкретні підзаходи.

Формування заходів та підзаходів схем оптимізації здійснюється за 3 рівнями групування, а для великих систем (таких як місто Дніпро) – за 4 рівнями групування. Оптимальна структура робіт забезпечує орієнтовну вартість реалізації заходу найнижчого рівня в діапазоні від 1 до 3 відсотків (для великих систем – від 0,5 до 1,5 відсотків) загальної вартості реалізації заходів схем оптимізації. Розробка проєктно – кошторисної документації та закупівля об'єктів обов'язково виділяються як окремі заходи в ICP.

Заходи в межах оптимального сценарію класифікуються за рівнем їхнього впливу на показник стійкості.

1. Першочергові заходи безпеки (заміна газоподібного хлору на безпечні реагенти (гіпохлорит натрію, діоксид хлору), впровадження бар'єрних технологій (ПАВ, УФ) та встановлення систем раннього виявлення ХБРЯ – загроз).

2. Заходи енергетичної автономності (встановлення автономних джерел живлення, впровадження «насосів блекауту» з низьким пусковим струмом та

частотного регулювання (ЧРП)).

3. Заходи технологічної децентралізації (створення резервних вузлів доочищення води зі свердловин та розосередження критичних потужностей для запобігання каскадним відмовам).

4. Заходи цифрової трансформації (впровадження систем ГІС та АСУ ТП для оперативного управління режимами роботи мережі на основі гідравлічного моделювання).

Оскільки фінансовий ресурс громад є обмеженим, пріоритизація заходів здійснюється із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення для управління проектами. Згідно з нормативними вимогами, рівень пріоритетності визначається числовим значенням від 0 до 1000 у напрямку збільшення важливості, з точністю встановлення від 50 до 100 одиниць.

Таблиця 3.5.1

Нормативна матриця пріоритизації та розподілу заходів у часі

Значення (бали)	Рівень пріоритетності	Характеристика заходів згідно з вимогами Порядків	Термін реалізації
900 – 1000	Надзвичайно важливі	Ліквідація ХБРЯ-загроз, забезпечення енергонезалежності головних вузлів.	Короткострокові (до 1 – 2 років)
700 – 900	Високопріоритетні	Впровадження ГІС, резервування критичних магістралей, ліквідація «вузьких місць».	Короткострокові (до 1 – 2 років)
400 – 600	Середньопріоритетні	Масштабна реконструкція зношених мереж, перехід на нові технології очищення.	Середньострокові (3 – 5 років)
0 – 300	Низькопріоритетні	Стратегічне розширення систем, повна декарбонізація та комплексна автоматизація.	Довгострокові (понад 5 років)

Визначення пріоритетності базується на важливості реалізації заходу схеми оптимізації з використанням методу парних порівнянь «або/або» (аналізується ситуація: один захід виконаний, інший – ні). Захід, який є більш важливим для збереження функціональності системи, отримує вищий бал.

Математично пріоритетність заходу (P_j) визначається як функція від його внеску в загальну стійкість та економічної доцільності:

$$P_j = \frac{\Delta R(S)_j}{Inv_j T_{rec}} \quad (3.5.1)$$

де:

$\Delta R(S)_j$ – приріст інтегрального коефіцієнта стійкості від реалізації j -го заходу;

Inv_j – обсяг капітальних інвестицій;

T_{rec} – час, необхідний для реалізації заходу та виходу системи на новий рівень стійкості.

Обов'язковою умовою валідації пріоритету є верифікація кожного заходу на гідравлічній моделі. Тобто, якщо моделювання показує, що захід не оптимізує перерозподіл тисків або якість води при загрозах, такий захід отримує нижчий пріоритет. Також до найвищого пріоритету (до ієрархічної структури робіт) обов'язково включаються заходи, що вже передбачені підписаними меморандумами або профінансованими договорами.

Таким чином, формування переліку заходів за принципом побудови ІСР дозволяє перетворити складний інфраструктурний комплекс на систему керованих завдань із чітко визначеними фінансовими лімітами.

Впровадження 1000 – бальної шкали та методу «або/або» у нормативні документи гарантує, що обмежені фінансові ресурси територіальних громад та кошти міжнародних донорів будуть спрямовані виключно на заходи, що забезпечують найвищий коефіцієнт приросту стійкості систем в умовах надзвичайних ситуацій.

3.6. Методичний підхід до забезпечення стійкості систем під час надзвичайних ситуацій та у воєнний час

Класична методологія проектування та оптимізації систем питного водопостачання та водовідведення, що панувала у докризовий період, базувалася виключно на принципах детермінованого підходу, мінімізації капітальних і експлуатаційних витрат (CAPEX / OPEX) та забезпеченні нормативних гідравлічних параметрів за умов стабільного зовнішнього енергопостачання. Проте досвід ведення воєнних дій та ліквідації наслідків масштабних техногенних катастроф в Україні виявив повну неспроможність статичних моделей адаптуватися до каскадних збоїв інфраструктури. Це зумовило об'єктивну наукову та практичну необхідність радикальної перебудови нормативно – методичного забезпечення галузі.

Включення окремого розділу з оцінки стійкості до розроблених та затверджених Порядків є науково обґрунтованим кроком, який трансформує філософію інфраструктурного планування від концепції «мінімальної вартості» до концепції «гарантованої стійкості».

Наукова новизна пропонованого методичного підходу полягає в переході від однокритеріальної задачі статичної оптимізації мереж до багатокритеріального стохастичного моделювання поведінки систем у критичних режимах. Традиційні схеми оптимізації розглядалися як інструмент довгострокового розвитку за стабільних умов. Запропонований методичний підхід перетворює схему оптимізації на динамічну систему управління ризиками, що поєднує наступне.

1. Гідравлічне моделювання нестаціонарних процесів та аварійних перемикачів за умов дефіциту потужності.

2. Оцінку кінетики трансформації забруднюючих речовин при виникненні хімічних, біологічних, радіаційних та ядерних (ХБРЯ) загроз.

3. Оптимізацію енергетичного балансу через інтеграцію стаціонарних децентралізованих технологій та альтернативних джерел генерації.

Для кількісної верифікації інженерних рішень, що включаються до схем оптимізації, розроблено математичний апарат багатокритеріальної оцінки інтегрального коефіцієнта стійкості систем питного водопостачання та

водовідведення (R_{total}). На відміну від існуючих евристичних підходів, запропонована модель базується на теорії стійкості складних систем та враховує ймовірнісний характер виникнення зовнішніх збурень.

Цільова функція стійкості системи під час надзвичайних ситуацій має вигляд:

$$\max R_{total} = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot K_{s,i}(X) \rightarrow 1.0 \quad (3.6.1)$$

де:

$K_{s,i}(X)$ – часткові критерії стійкості (енергетичний, технологічний, реагентний);

ω_i – вагові коефіцієнти значущості, визначені методом аналізу ієрархій ($\sum \omega_i = 1$).

Для забезпечення адекватності математичної моделі реальним умовам експлуатації систем питного водопостачання та водовідведення в кризових ситуаціях, цільова функція розраховується з урахуванням скоригованої системи технічних обмежень.

Фізичний та технологічний зміст наведених обмежень полягає у наступному.

1. Гідравлічне обмеження (напір у мережі).

Перша умова гарантує, що гідравлічний напір ($H_{j,t}$) у кожному вузлі мережі (j) в будь-який момент часу (t) підтримується в експлуатаційних межах – від мінімально необхідного (H_{min}) до максимально допустимого (H_{max}). Для забезпечення термінологічної чіткості та уникнення плутанини з показниками електричної потужності, гідравлічний напір позначено класичним символом H (вимірюється в метрах водяного стовпа), відмовившись від використання символу тиску P .

2. Обмеження за об'ємом водопостачання (критичний мінімум).

Друга нерівність вимагає, щоб сумарний обсяг доступної для подачі води ($\sum Q_{avail,t}$) завжди дорівнював або перевищував критично необхідний мінімум (Q_{crit}). Цей мінімум розраховується з потреб базового життєзабезпечення населення (наприклад, 50 л/добу на особу) та безперебійного функціонування критичних об'єктів (шпиталів, підрозділів ДСНС тощо).

3. Санітарно – хімічне обмеження (безпека води).

Третя умова відіграє ключову роль у разі виникнення ХБРЯ-загроз або екстремального забруднення джерел водопостачання. Вона строго регламентує, що поточна концентрація будь-якої небезпечної речовини у питній воді ($C_{sub,t}$) після

проходження бар'єрних систем очищення не повинна перевищувати гранично допустимі концентрації (L_{MPC}), встановлені санітарними нормами.

4. Енергетичне обмеження (баланс потужностей).

Четверта умова визначає межі енергетичної автономності. Вона передбачає, що електрична потужність, необхідна для роботи насосного та очисного обладнання в критичному режимі ($N_{req,t}$), має бути повністю забезпечена сумарною потужністю наявних резервних джерел генерації ($\sum N_{gen,t}$) та енергією, збереженою в акумуляторних системах ($N_{acc,t}$).

Інтегральний коефіцієнт стійкості розраховується за адитивно – мультиплікативною формою:

$$R_{total} = \alpha \cdot K_{en} + \beta \cdot K_{tech} + \gamma \cdot K_{safe}, \quad (3.6.2)$$

де:

K_{en} – коефіцієнт енергетичної незалежності – відношення потужності автономних джерел живлення до необхідної потужності для забезпечення критичного водоспоживання (20 л/добу на особу);

K_{tech} – коефіцієнт технологічної гнучкості – частка населення, яка може бути забезпечена водою через децентралізовані вузли при аварії на магістральних водоводах;

K_{safe} – коефіцієнт реагентної безпеки – безрозмірна величина (від 0 до 1), що визначається рівнем відмови від використання газоподібного хлору та наявністю бар'єрів доочищення (ПАВ, УФ);

α, β, γ – вагові коефіцієнти, визначені за допомогою методу аналізу ієрархій для конкретної територіальної громади.

Масштабному впровадженню технологій неодмінно має передувати етап експериментального обґрунтування. Як доводить досвід розробки пілотної установки для Деснянської водопровідної станції м. Києва, тестування технологічних схем очищення (включаючи дозування ПАВ та ГАВ) у реальних умовах є обов'язковою передумовою для включення цих заходів до схеми оптимізації.

Впровадження розробленого підрозділу у нормативну базу дозволяє проєктним організаціям чітко типізувати загрози та обирати верифіковані технологічні

алгоритми захисту критичної інфраструктури, як показано нижче у Таблиці 3.6.1.

Таблиця 3.6.1

Матриця інженерно – технологічних рішень забезпечення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення за типами кризових ситуацій

Тип кризового сценарію	Вплив на систему (параметри вразливості)	Науково обґрунтований механізм стійкості	Технологічне та нормативне забезпечення
Тотальний довготривалий блекаут	Падіння тиску до 0 МПа, зупинка КНС, загроза затоплення територій стічними водами.	Диференціація насосних станцій за категоріями; перехід на частотно-регульовані приводи (ЧРП) з оптимізацією гідродудару.	Впровадження дизель-генераторних комплексів, будівництво дахових та наземних СЕС на об'єктах водоканалів, когенерація на біогазі КОС.
Пряме механічне руйнування магістральних водоводів, колекторів	Локальне або повне припинення подачі води до цілих житлових масивів.	Гідравлічне секціонування мереж на основі геоінформаційного моделювання (QGIS / EPANET).	Автоматизоване відсікання пошкоджених ділянок кільцевих мереж; запуск стаціонарних контейнерних модулів доочищення.
Екстремальне антропогенне або ХБРЯ-забруднення джерела	Перевищення ГДК токсикантів у 10–100 разів; непридатність класичних схем коагуляції.	Активізація багаторівневого сорбційно-окиснювального бар'єру; інтенсифікація процесів пластівцеутворення.	Монтаж автоматизованих вузлів дозування порошкоподібного активованого вугілля (ПАВ); застосування систем УФ-опромінення.
Руйнування складів газоподібного хлору	Витік токсичного газу, хімічне зараження персоналу та прилеглих селитебних зон.	Повна ліквідація хлорних об'єктів підвищеної небезпеки; перехід на in-situ генерацію окисників.	Реконструкція реагентних господарств із впровадженням установок синтезу діоксиду хлору або електролізного гіпохлориту натрію.
Сезонне та техногенне погіршення якості води у річках	Зростання концентрації тригалогенметанів (ТГМ), фітопланктону, перманганатної окиснюваності.	Попереднє експериментальне моделювання динамічних процесів очищення перед капітальною модернізацією.	Обов'язкове розгортання пілотних дослідницьких установок безпосередньо на станціях (наприклад, досвід Деснянської ВОС) для відпрацювання 4-х схем очищення протягом року.

Для наочного представлення логістично – технологічних потоків розроблено загальну структурно – функціональну схему методичного підходу, яка показана

нижче на Рисунку 3.6.1. Схема відображає інтеграцію ГІС – моделювання з наступними алгоритмами реагування: при виникненні тригерної події (блекаут, руйнування, ХБРЯ) система автоматично визначає вектор компенсаторних дій (запуск ЧРП від резервного живлення, гідравлічне зонування або активація ПАВ). Усі вектори сходяться до єдиної мети – забезпечення критичного водоспоживання громади (Q_{crit}) за допомогою підключення стаціонарних локальних модулів.

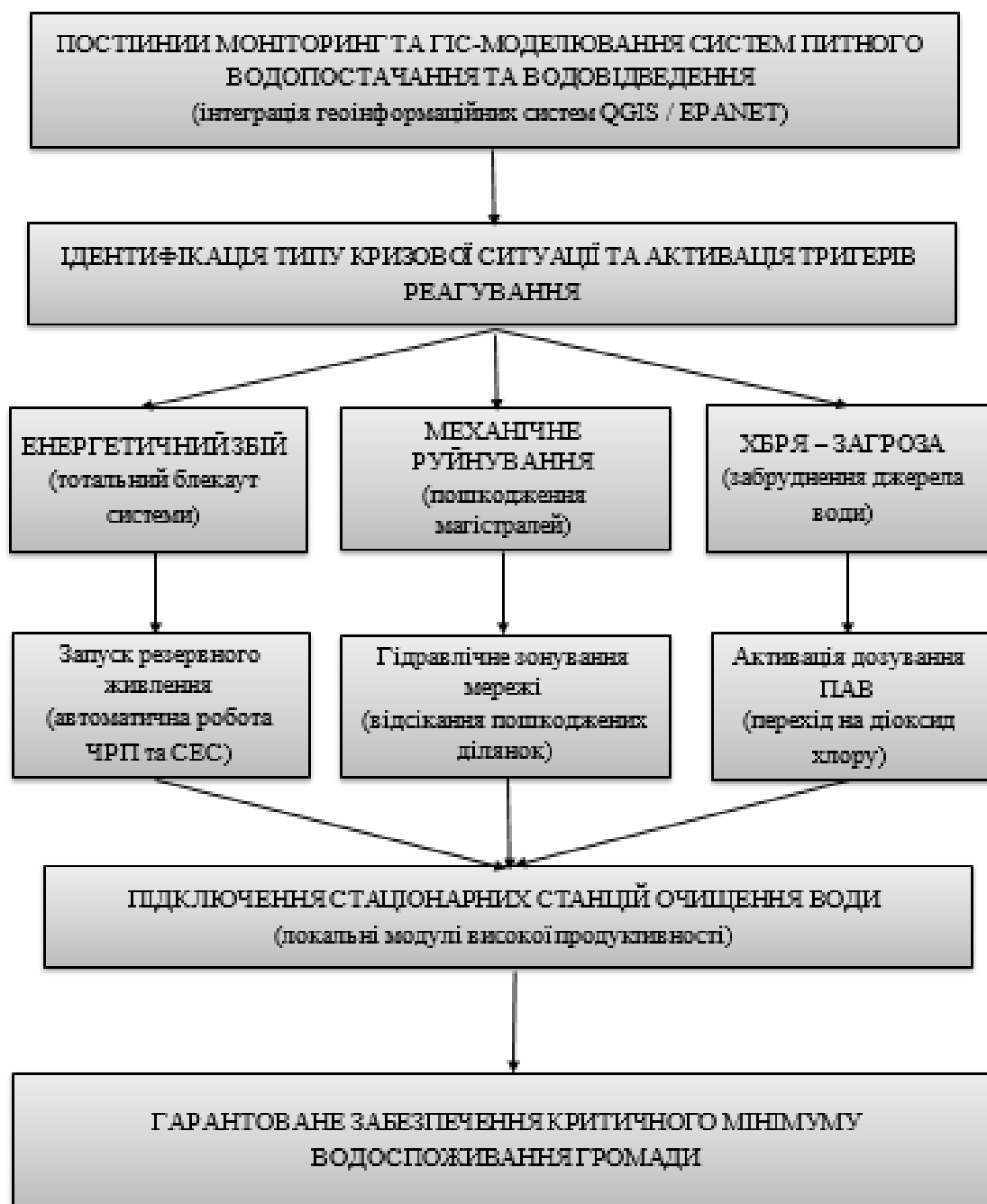


Рисунок 3.6.1. Структурно – функціональна схема методичного підходу до управління стійкістю системами питного водопостачання та водовідведення у кризовий період

Ефективність запропонованого підходу доводиться через динаміку збереження надійності системи. На Рисунку 3.6.2 графічно змодельовано криву падіння та відновлення працездатності мережі $P(t)$ під впливом каскадних аварій. Графік демонструє, що при традиційному підході надійність стрімко падає нижче критичної межі життєзабезпечення. Натомість, впровадження рішень, регламентованих новими Порядками (наявність ПАВ, автономного живлення та стаціонарних станцій), формує «плато стійкості», утримуючи систему в межах контрольованого функціонування. Тобто, наведено математично змодельовану криву падіння та відновлення працездатності водопровідної мережі міста за умов виникнення каскадних аварій (наприклад, одночасний блекаут та пошкодження водогону) за традиційного та запропонованого ризик – орієнтованого підходу.

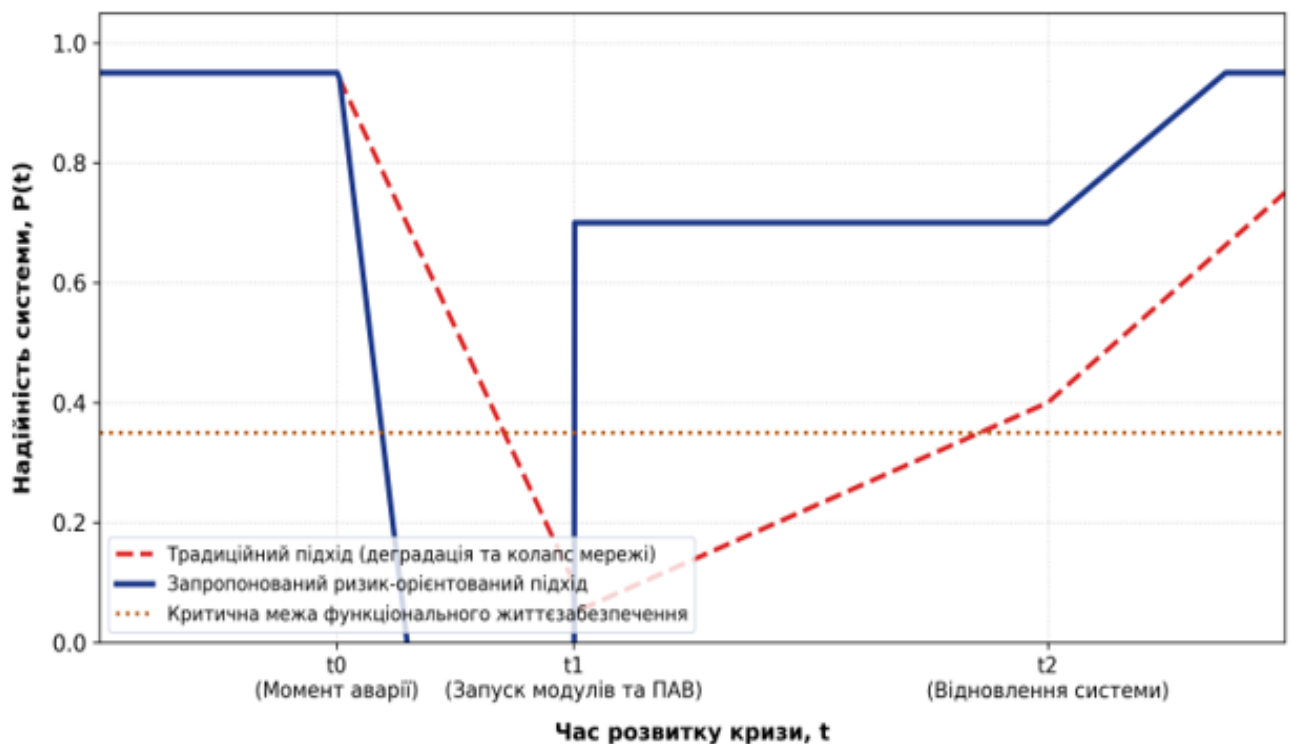


Рисунок 3.6.2. Динаміка зміни надійності систем питного водопостачання та водовідведення під впливом критичних навантажень воєнного часу

Як свідчить графічне моделювання на Рисунку 3.6.2, під час застосування традиційного підходу рівень надійності системи стрімко падає нижче критичної межі

життєзабезпечення через відсутність внутрішніх резервів та гнучкості. Впровадження рішень, регламентованих новими Порядками, дозволяє утримати систему в межах контрольованого функціонування за рахунок швидкого (протягом декількох хвилин) переходу на автономне живлення, введення в експлуатацію стаціонарних локальних станцій очищення води і негайної подачі ПАВ для нівелювання ризиків забруднення.

Таким чином, у цьому підрозділі обґрунтовано, що включення нового методичного підходу до складу розроблених та затверджених Порядків є науковою необхідністю, яка дозволяє перейти від застарілих однокритеріальних економічних моделей до багатокритеріального проєктування адаптивних та стійких інфраструктурних систем.

Розроблено математичну модель та інтегральний критерій стійкості R_{total} , який вперше комплексно враховує коефіцієнти енергетичної автономії, технологічної адаптивності та реагентно – бар’єрної безпеки, забезпечуючи кількісну оцінку стійкості інженерних рішень.

На основі аналізу кінетики сорбції доведено високу ефективність превентивного впровадження вузлів ПАВ як універсального бар’єра проти ХБРЯ – загроз, а також обґрунтовано повну відмову від використання газоподібного хлору на користь безпечних реагентів, що генеруються безпосередньо на об’єктах питного водопостачання та водовідведення.

Доведено, що інтеграція високопродуктивних стаціонарних модулів очищення води, підкріплена результатами попередніх комплексних пілотних досліджень безпосередньо на станціях, забезпечує надійне гідравлічне та технологічне функціонування систем, підвищуючи їхній загальний потенціал стійкості на 35–50%.

3.7. Висновки до розділу 3

1. Розроблено та науково обґрунтовано комплексну систему індикаторних показників для об’єктивної оцінки поточного стану та ефективності функціонування систем питного водопостачання та водовідведення в умовах кризових ситуацій. Запропонована логіко – математична модель їх формування, яка відображає ієрархічний перехід від елементарних експлуатаційних даних до агрегованих

інтегральних оцінок стійкості.

2. Запропоновано методичний підхід до формування та порівняльного аналізу альтернативних сценаріїв розвитку інфраструктури (базового, оптимізаційного та адаптивного). Доведено, що перехід до адаптивно – гібридної архітектури (сценарій «Стійкий») математично забезпечує найвищий рівень інтегральної стійкості системи та її здатності до швидкого відновлення.

3. Розроблено методологію аналізу, оцінювання та управління ризиками, що базується на інтеграції трифакторної моделі (ймовірність, тяжкість наслідків, базова вразливість) у структуру схем оптимізації муніципальних систем. Сформовано шкалу класифікації інфраструктурних ризиків із чітким розподілом на чотири зони безпеки, що дозволяє територіальним громадам здійснювати обґрунтоване ранжування інвестиційних заходів.

4. Доведено необхідність обов'язкового застосування геопросторового аналізу та гідравлічного моделювання як інструментів верифікації технічних рішень. Сформовано алгоритм пріоритизації заходів в оптимальному сценарії, який враховує приріст загальної стійкості системи на одиницю капітальних інвестицій та швидкість реалізації.

5. Обґрунтовано методичний підхід до управління стійкістю систем під час надзвичайних ситуацій та у воєнний час. Доведено високу ефективність превентивного впровадження вузлів ПАВ (порошкоподібного активованого вугілля) як універсального сорбційного бар'єра проти ХБРЯ – загроз. Також доведено доцільність застосування високопродуктивних станцій доочищення, здатних оперативно компенсувати втрату основних потужностей та гарантувати контрольоване водопостачання.

РОЗДІЛ 4. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНА ОЦІНКА СТІЙКОСТІ СИСТЕМ ПИТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ВОДОВІДВЕДЕННЯ

4.1. Формалізація задачі підвищення стійкості як багатокритеріальної проблеми

Забезпечення безперебійного та безпечного функціонування систем питного водопостачання та водовідведення є одним із найважливіших завдань національної безпеки, що набуває безпрецедентної актуальності в умовах зростаючих ризиків воєнного, техногенного, екологічного та соціального характеру. Аналіз руйнувань об'єктів критичної інфраструктури в Україні протягом останніх років свідчить про те, що класичні підходи до проєктування та експлуатації, орієнтовані на показники статичної надійності в мирний час, виявилися неспроможними протистояти каскадним аваріям, тотальним блекаутам та цілеспрямованим атакам. Для розв'язання цієї проблеми необхідний перехід до нової парадигми – управління стійкістю (резильєнтністю) інфраструктури.

У межах даного дисертаційного дослідження стійкість розглядається як комплексна системна категорія, а саме – здатність систем питного водопостачання та водовідведення витримувати зовнішні деструктивні удари, зберігати життєво важливі функції за рахунок резервування і гнучкості, гарантувати санітарно – епідеміологічну безпеку (зокрема, через застосування порошкоподібного активованого вугілля – ПАВ як надійного сорбційного бар'єра замість застарілих та небезпечних хлорних технологій) та максимально швидко відновлювати працездатність (C_t) після збоїв.

З позицій системного аналізу та дослідження операцій, управління такою стійкістю не може бути зведене до пошуку екстремуму однієї функції (наприклад, суто мінімізації капітальних витрат). Ця проблема об'єктивно є складною багатокритеріальною задачею прийняття рішень в умовах високого рівня невизначеності та ризику.

Логіко – математична формалізація задачі підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення включає наступні базові простори та вектори.

1. Вектор стану системи (S), який характеризує поточний експлуатаційний, гідравлічний та безпековий стан інфраструктури (рівень зношеності мереж, наявність резервуарів чистої води, стан очисних споруд).

2. Множина управлінських рішень та альтернатив (X), як вектор $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \in \Omega$, де Ω – область допустимих рішень. Сюди входять заходи з модернізації, інтеграція автономного живлення, а також впровадження децентралізованих рішень – наприклад, використання високопродуктивних станцій (таких як модульні системи типу Ecosoft) для розосередження потужностей очищення.

3. Вектор некерованих збурень та ризиків (P), що описує ймовірнісні екстремальні ризики $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ (тривалі енергетичні блекаути, ракетні обстріли, ХБРЯ-забруднення джерел водопостачання).

Глобальна мета формалізується як максимізація інтегрального показника стійкості $R(S)$, який залежить від вектору цільових функцій $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_k\}$. Оскільки досягнення абсолютної безпеки унеможлиблюється економічними реаліями, оптимізація вимагає врахування об'єктивного конфлікту критеріїв. Для деталізації цього конфлікту та наукового обґрунтування пошуку компромісних (Парето – оптимальних) рішень розроблено відповідну матрицю, яка приведена нижче у Таблиці 4.1.1.

Запропонована матрична структура дозволяє формалізувати взаємні суперечності між технологічними, безпековими та фінансовими складовими оптимізаційного процесу, де максимізація надійності та ХБРЯ – захищеності неминуче призводить до збільшення першочергового CAPEX. Математичний аналіз зазначених взаємозв'язків спрямований на відсікання завідомо неефективних інженерних альтернатив та звуження області допустимих варіантів до звуженої множини Парето, що є критично важливим в умовах жорстких бюджетних лімітів муніципалітетів. Таким чином, сформована критеріальна база виступає основою для наступного експертного ранжування та згортання векторного критерію в інтегральний індекс стійкості $R(S)$ відповідно до вимог державних Порядків.

Таблиця 4.1.1

Матриця конфлікту цільових критеріїв у багатокритеріальній задачі оптимізації стійкості систем питного водопостачання та водовідведення

Цільовий критерій	Напрямок оптимізації	Конфліктуючий критерій	Суть конфлікту при прийнятті управлінських рішень
Енергетична автономність (C_e)	$\rightarrow \max$	Капітальні витрати ($CAPEX$)	Закупівля потужних генераторних установок, «насосів блекауту» та СЕС потребує залучення значних інвестицій МФО.
Санітарно-хімічна безпека (C_{safe})	$\rightarrow \max$	Експлуатаційні витрати ($OPEX$)	Перехід на сучасні сорбенти (вузли дозування ПАВ) та генерацію безпечних реагентів in-situ здорожчує процес підготовки 1 м ³ води.
Час відновлення системи (C_t)	$\rightarrow \min$	Фінансові обмеження (L_{fin})	Зменшення часу реакції T_{rec} вимагає створення ГІС-платформ та телеметрії, що жорстко обмежено поточними бюджетами підприємств.
Гідравлічна цілісність / Втрати води (C_w)	$\rightarrow \min$	Час реалізації (T_{impl})	Масштабна перекладка зношених магістральних водоводів та колекторів вимагає зупинки систем і значного часу.

Для наочної візуалізації архітектури формалізованої проблеми та узгодження вхідних параметрів із математичним апаратом розроблено структурно – логічну схему (Рисунок 4.1.1).

Ця схема відображає наскрізний алгоритм трансформації первинних експлуатаційних даних у кількісні критерії стійкості, наочно ілюструючи точки перетину між керованими інженерними альтернативами та некерованими безпековими загрозами. Графічна декомпозиція дозволяє верифікувати інформаційні потоки на кожному етапі оптимізації – від блоку оцінювання вразливостей конкретних технологічних вузлів до фінального згортання локальних індексів у глобальний показник резильєнтності всієї системи. Таким чином, представлена архітектура виступає основою для розроблення математичного ядра підтримки

прийняття рішень, що мінімізує вплив суб'єктивних чинників при формуванні планів розвитку муніципального сектору

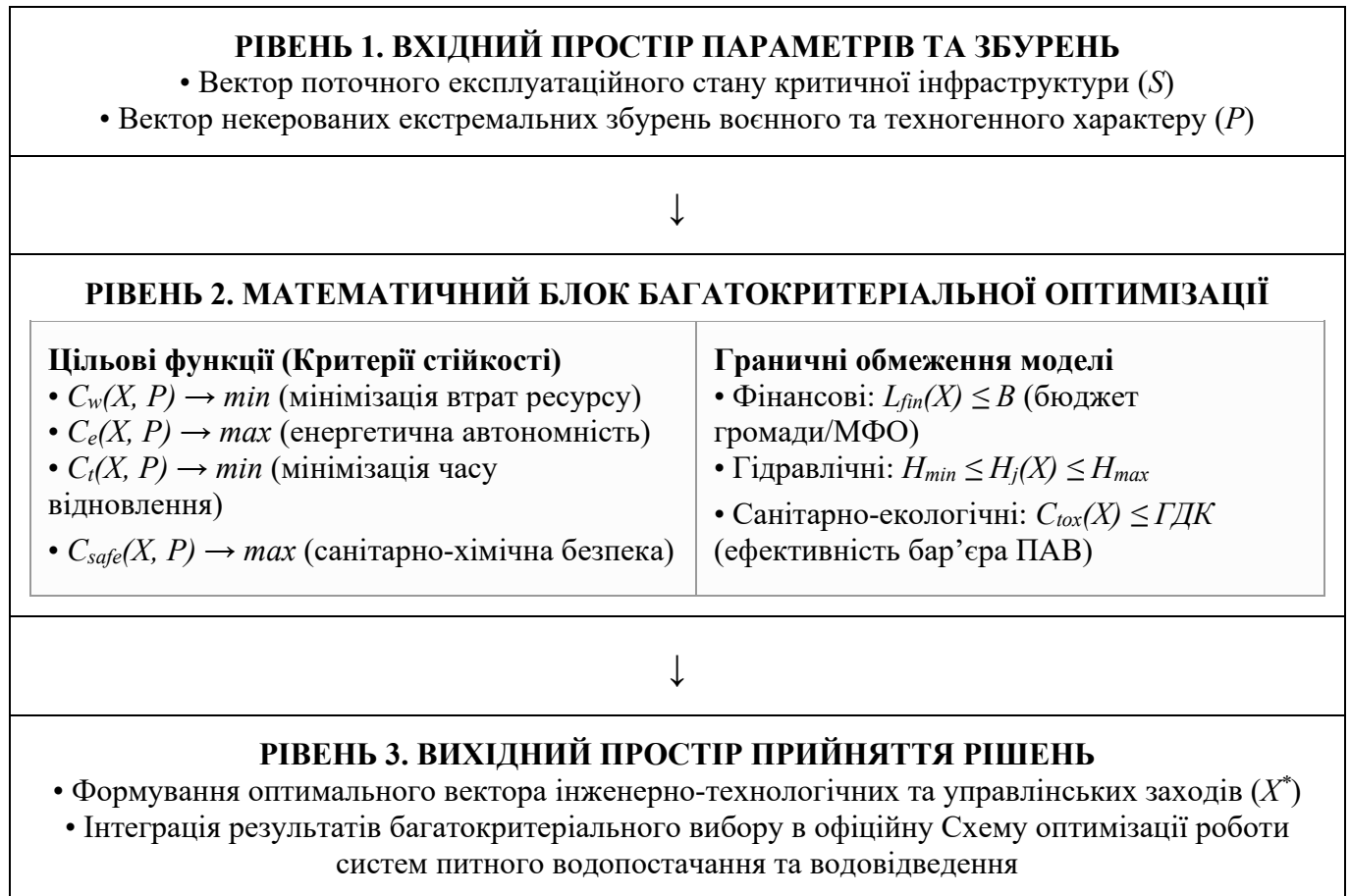


Рисунок 4.1.1. Структурно – логічна схема формалізації багатокритеріальної задачі підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення

Спираючись на системний аналіз, формалізована задача зводиться до пошуку такого вектору управлінських рішень $X^* \in \Omega$, який забезпечує максимальне значення агрегованого критерію стійкості за наявності стохастичних ризиків P :

$$R(S) = F (C_w(X, P), C_e(X, P), C_t(X, P), C_{safe}(X, P)) \rightarrow \max \quad (4.1.1)$$

За обов'язкової умови дотримання жорсткої системи обмежень:

$L_{fin}(X) \leq B$ (вартість заходів не перевищує фінансовий бюджет B , включно з коштами грантів та кредитів МФО);

$H_{min} \leq H_j(X) \leq H_{max}$ (забезпечення нормативного вільного гідравлічного напору

у j-му вузлі мережі під час кризових режимів);

$C_{tox}(X) \leq \text{ГДК}$ (санітарно – епідеміологічні обмеження на вміст небезпечних речовин після проходження сорбційно – бар’єрних стадій).

Оскільки перелічені цільові критерії мають принципово різну фізичну розмірність (кубічні метри, кВт·год, години, гривні) та різну векторну спрямованість, пряме їх математичне порівняння є неможливим. Отже, вирішення цієї формалізованої задачі потребує обов’язкового застосування методів скаляризації векторних критеріїв – зокрема побудови інтегральної функції корисності із використанням вагових коефіцієнтів.

Таким чином, у цьому підрозділі сформовано комплексний науково – методичний підхід до розуміння категорії стійкості систем питного водопостачання та водовідведення не як статичного технічного показника, а як динамічної здатності інфраструктури до адаптації, швидкого відновлення працездатності (C_t) та протидії каскадним аваріям в умовах воєнного і техногенного стану.

Здійснено логіко – математичну формалізацію задачі підвищення стійкості як багатовимірною простору, що охоплює вектор поточного стану інфраструктури (S), множину допустимих керованих рішень (X) та стохастичний вектор некерованих зовнішніх збурень і ХБРЯ-ризиків (P).

Розроблено та науково обґрунтовано матрицю конфлікту цільових критеріїв оптимізації (енергетичної автономності, санітарно – хімічної безпеки, мінімізації часу відновлення та втрат води), яка наочно демонструє суперечливість між технологічними потребами надійності та жорсткими капітальними й експлуатаційними обмеженнями (CAPEX / OPEX).

Побудовано трирівневу структурно – логичну схему багатокритеріальної оптимізації, яка пов’язує вхідні параметри деструктивних впливів із процесом пошуку Парето – оптимальних рішень. Доведено необхідність застосування методів скаляризації та інтегральних функцій корисності для переходу від векторної моделі до конкретних інженерних заходів у Схемах оптимізації систем централізованих водопостачання та водовідведення.

4.2. Побудова логіко–математичної моделі стійкості систем питного водопостачання та водовідведення

Забезпечення надійного функціонування систем питного водопостачання та водовідведення є критично важливим завданням у контексті зростаючих ризиків техногенного, екологічного та соціального характеру. Для досягнення цієї мети необхідно розробити цілісну концептуальну модель, яка б дозволяла формувати, впроваджувати й координувати заходи, спрямовані на підвищення стійкості систем. Розглянемо ключові вектори такої концепції.

Так, перший вектор - це стійкість як системна категорія. Стійкість розглядається як здатність систем питного водопостачання та водовідведення протистояти зовнішнім та внутрішнім впливам, адаптуватися до змінних умов функціонування та забезпечувати безперервне надання послуг населенню.

Другий вектор - ієрархічність управління. Така модель передбачає багаторівневий підхід до управління: на державному, регіональному та муніципальному рівнях з урахуванням ролі суб'єктів господарювання та споживачів.

Третій вектор - це орієнтація на життєвий цикл. Управлінські рішення щодо систем питного водопостачання та водовідведення повинні прийматися з урахуванням повного життєвого циклу інфраструктури - від проектування та будівництва до експлуатації, модернізації та утилізації.

І четвертий вектор - комплексність впливів. Ця модель враховує взаємодію технічних, організаційно - економічних, правових, екологічних та соціальних чинників, що формують загальний рівень стійкості систем.

Логіко - математична формалізація концептуальної моделі вирішення проблеми підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення включає: постановку задачі, вхідні параметри, систему цілей, множину альтернатив і обмежень, а також інтеграцію ризиків і впливів.

Зробимо загальний підхід. Сформулюємо модель як багатокритеріальну оптимізацію з урахуванням факторів ризику, технічного стану, економіки та екології. Прийmemo ланцюг прийнятих понять і зв'язків, які визначають зміст структури предметної області, що розглядається:

S - система питного водопостачання та водовідведення,

$R(S)$ - цільова функція, що характеризує рівень стійкості системи,

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ - вектор управлінських рішень (модернізація, інвестиції, резервування тощо),

$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ - вектор зовнішніх і внутрішніх факторів впливу (технічний стан, ризику, енергозалежність),

$Z = \{z_1, z_2, \dots, z_k\}$ - вектор цільових функцій,

$C(X, P)$ - система обмежень.

Цільова функція стійкості характеризується формулою:

$$\max_x R(S) = f(Z(X, P)), \quad (4.2.1)$$

де функція f - агрегуюча функція, що оцінює рівень стійкості як композицію цільових критеріїв.

Цільова функція підвищення стійкості $R(S) \rightarrow \max$ розглядається як інтегральний показник здатності системи до відновлення. Вона враховує мінімізацію трьох критичних параметрів, що є обов'язковими для моніторингу згідно з новими Порядками:

1. C_w – втрати води (ефективність мереж);
2. C_e – енергозатратність (енергетична стійкість);
3. C_t – час відновлення після збою (операційна гнучкість).

Для зручності ідентифікації та системного аналізу всіх компонентів моделі розроблено відповідну класифікаційну таблицю параметрів (Таблиця 4.2.1).

Запропонована структуризація дозволяє розділити множину вихідних даних на керовані змінні проектування та детерміновані чинники зовнішнього середовища, що є базовою умовою для коректного обчислення критеріїв C_w , C_e та C_t . Математична типізація цих показників забезпечує можливість переходу від різномірних фізичних величин (таких як питомі витрати електроенергії, об'єми витоків чи години простою) до нормованих безрозмірних індексів у розрахунковому блоці моделі. Таким чином, представлена класифікація виступає інформаційним базисом для формування

матриці обмежень $C(X, P)$, гарантуючи високу точність прогнозування траєкторії деградації інфраструктури при симуляції каскадних відмов.

Таблиця 4.2.1

Структура параметрів логіко – математичної моделі стійкості систем питного водопостачання та водовідведення

Група параметрів	Позначення	Зміст та приклади впровадження
Управлінські рішення (Вектор X)	X	Впровадження локальних очисних систем (контейнерних модулів), перехід на сорбційні технології (зокрема дозування ПАВ), інтеграція автономного живлення.
Фактори ризику (Вектор P)	P	Тривала відсутність електроенергії (блекаут), ХБРЯ-забруднення джерел, руйнування критичної інфраструктури.
Часткові критерії (Вектор Z)	Z	Час відновлення працездатності, рівень хіміко-санітарної безпеки, рівень забезпечення резервною потужністю.
Система обмежень (Блок C)	$C(X, P)$	Фінансові ліміти бюджету громади або інвестицій МФО, забезпечення нормативного гідравлічного напору під час кризових режимів.

Множина цілей Z характеризується матрицею:

$$Z = \begin{bmatrix} z_1(X, P) \\ z_2(X, P) \\ z_3(X, P) \\ \vdots \\ z_k(X, P) \end{bmatrix} \rightarrow \begin{cases} z_1 - \text{мінімізація втрат води} \\ z_2 - \text{мінімізація енергоспоживання} \\ z_3 - \text{максимізація надійності (кількість відмов)} \\ z_4 - \text{мінімізація витрат на обслуговування} \\ z_5 - \text{мінімізація ризику надзвичайних ситуацій} \end{cases} \quad (4.2.2)$$

Вплив параметрів на цілі характеризується матрицею:

$$M = \begin{bmatrix} \frac{\partial z_1}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial z_1}{\partial p_m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial z_k}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial z_k}{\partial p_m} \end{bmatrix} \quad (4.2.3)$$

Ця матриця показує, як зміна кожного параметра (наприклад, зношення труб, вартість енергії) впливає на кожну цільову функцію.

Система обмежень C характеризується формулою:

$$C(X, P) = \begin{cases} g_1(X, P) \leq B_{\text{budget}} & \text{(бюджетне обмеження)} \\ g_2(X) \leq T_{\text{time}} & \text{(терміни виконання)} \\ g_3(X, P) \in \text{нормативне поле (ДБН, ISO)} \end{cases} \quad (4.2.4)$$

Агрегована функція корисності (зважене середнє) характеризується формулою:

$$R(S) = \sum_{i=1}^k w_i \cdot z_i(X, P) \quad (4.2.5)$$

де - вагові коефіцієнти цілей (визначаються методом експертного опитування, аналітичної ієрархії або ентропії).

Система піддається впливу ймовірних ризиків R_i , кожен з яких має ймовірність настання q_i :

$$\mathbb{E}[R(S)] = \sum_{i=1}^n q_i \cdot R_i(S) \quad (4.2.6)$$

або ж:

$$\min_X \sum_{i=1}^n q_i \cdot \text{Loss}_i(X) \quad (4.2.7)$$

де Loss_i - втрати при реалізації ризику i (наприклад, прорив труб, відмова насосної станції).

Для формування вхідних даних моделі використано розроблену автором Матрицю ризиків (на прикладі систем питного водопостачання та водовідведення міста Дніпро), яка класифікує загрози за техногенними, військовими та ХБРЯ-ризиками критеріями. На відміну від існуючих підходів, кожен ідентифікований ризик R_i отримує ваговий коефіцієнт w_i , що визначається через імовірність настання події та масштаб потенційних втрат ресурсів, що відповідає вимогам Закону України «Про критичну інфраструктуру».

Для кращої ілюстрації взаємозв'язків між вхідними параметрами, етапами аналізу та кінцевими управлінськими рішеннями розроблено узагальнену блок - схему концептуальної моделі вирішення проблеми підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення, яка приведена нижче на Рисунку 4.2.1.

Блок - схема включає:

- збір та попередню обробку даних про технічний стан об'єктів і зовнішні впливи;
- формування множини цілей та обмежень;
- визначення вагових коефіцієнтів методом аналізу ієрархій;
- математичну оптимізацію з урахуванням сценаріїв ризиків;
- формування переліку пріоритетних заходів;
- впровадження рішень та зворотний зв'язок у вигляді моніторингу результатів.

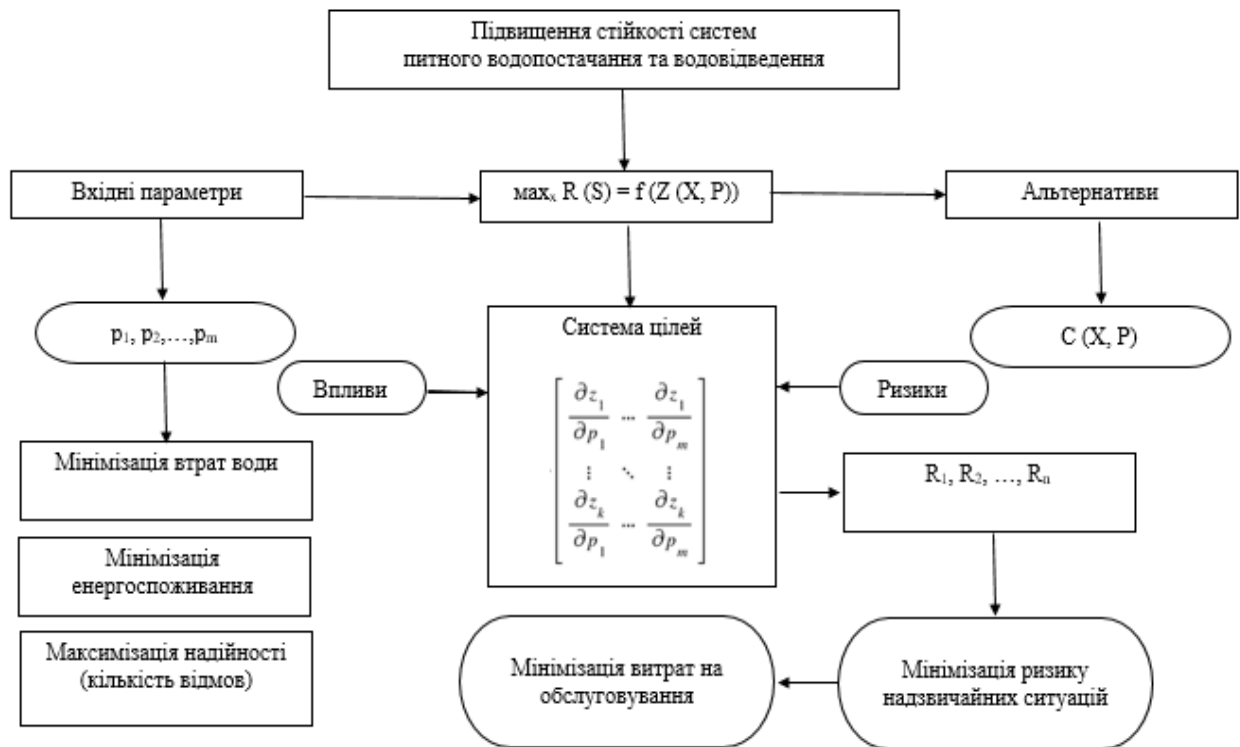


Рисунок 4.2.1. Блок – схема концептуальної моделі вирішення проблеми підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення

В рамках сформованого логіко - математичного формулювання було застосовано математичну оптимізацію.

Так, математична модель стійкості включає множину цільових функцій $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_k\}$, таких як мінімізація втрат води, енерговитрат, експлуатаційних витрат, ризику відмов та максимізація надійності послуг. Метою є знаходження такого вектору рішень $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, при якому цільова функція $R(S)$ набуває максимального значення, яке визначено у формулі (4.2.1) за умов впливу системи обмежень $C(X, P)$.

Тобто, застосовано метод зваженої суми, де значущість кожної мети визначається ваговим коефіцієнтом w_i , а також введено функції втрат у разі реалізації сценаріїв ризиків (наприклад, прорив магістралі, знеструмлення насосної станції).

Метод аналізу ієрархій було використано для визначення пріоритетності цільових критеріїв, які враховуються у загальній функції корисності. Процедура включає:

- формування ієрархічної структури (мета – критерії – підкритерії –

альтернативи);

- експертне попарне порівняння критеріїв за шкалою Сааті;
- розрахунок ваг w_i , які використовуються у формулі (4.2.5) для оцінки цільової функції $R(S)$.

Таким чином, враховується як кількісна, так і якісна значущість факторів, а також відображаються особливості конкретних регіональних систем.

Загалом застосування методу аналізу ієрархій дозволяє трансформувати стратегічні цілі сталого розвитку громади у конкретні технічні рішення. Зокрема, модель дозволяє математично довести пріоритетність впровадження децентралізованих модульних установок доочищення та «насосів блекауту» як найбільш ефективних заходів для підвищення стійкості в умовах обмеженого фінансування.

Ризик – орієнтовне планування дозволило перехід від реактивного управління до прогнозування загроз і превентивного моделювання сценаріїв. Кожен ідентифікований ризик R_i характеризується ймовірністю настання q_i та функцією втрат $Loss_i$. Очікуване зниження ефективності системи оцінюється через математичне сподівання, яке визначене у формулі (7).

Системний аналіз дає змогу цілісно охопити всі підсистеми, які утворюють функціональну структуру систем питного водопостачання та водовідведення. Застосування системного підходу забезпечує:

- виявлення критичних вузлів та «вузьких місць» у мережі,
- ідентифікацію причинно – наслідкових зв'язків між технічним станом інфраструктури, фінансовими обмеженнями та якістю надання послуг,
- розроблення альтернативних сценаріїв реагування на виклики.

Таким чином, інтегровану модель управління можна описати через логічну схему:

1. Управлінський блок (методологія та моделювання).
2. Екологічний блок.
3. Соціальний блок.
4. Регуляторно – інституційний блок.

5. Організаційно – економічний блок.

6. Технічний блок.

Запропонований підхід, що базується на аналізі чинної нормативної бази, наукових розробках, концептуальному та математичному моделюванні, дозволяє систематизувати процес збору, обробки та інтерпретації даних.

Таким чином, у цьому підрозділі розроблена логіко – математична модель зберігає комплексний системний підхід, об'єднуючи чотири ключові вектори стійкості: ієрархічність управління, орієнтацію на життєвий цикл, системність та комплексність ризикових впливів.

Впровадження структурованої таблиці параметрів (Вектори S, X, P, Z, C) дозволило чітко розмежувати керовані управлінські рішення та некеровані зовнішні збурення, створивши математичну базу для багатокритеріальної оптимізації.

Розроблена та візуалізована алгоритмічна блок – схема підтверджує, що процес вибору рішень носить ітераційний характер і базується на експертних оцінках (метод Сааті), гарантуючи об'єктивність вибору оптимізаційних рішень для схем оптимізації систем централізованих водопостачання та водовідведення.

4.3. Використання діаграми Ісікави для структурування причинно–наслідкових зв'язків ризиків

Для систематизації впливу різних груп чинників на підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення доцільно застосовувати метод діаграми причинно - наслідкових зв'язків (діаграму Ісікави). Це дозволяє виявити ключові напрями оптимізації, спрямовані на підвищення стійкості систем, якості послуг та ефективності управління. Тобто, використання діаграми Ісікави в цьому контексті дозволяє візуалізувати вплив різних груп чинників (ресурси, персонал, технології, нормативне середовище тощо) на ефективність системи.

Нижче наведено узагальнену діаграму Ісікави, де основною проблемою виступає низький рівень стійкості систем питного водопостачання та водовідведення, а гілки діаграми репрезентують головні групи факторів, що на неї впливають. Тобто, накреслений взаємозв'язок стійкості систем питного водопостачання та

водовідведення із заходами щодо її комплексного покращення, оптимізації.

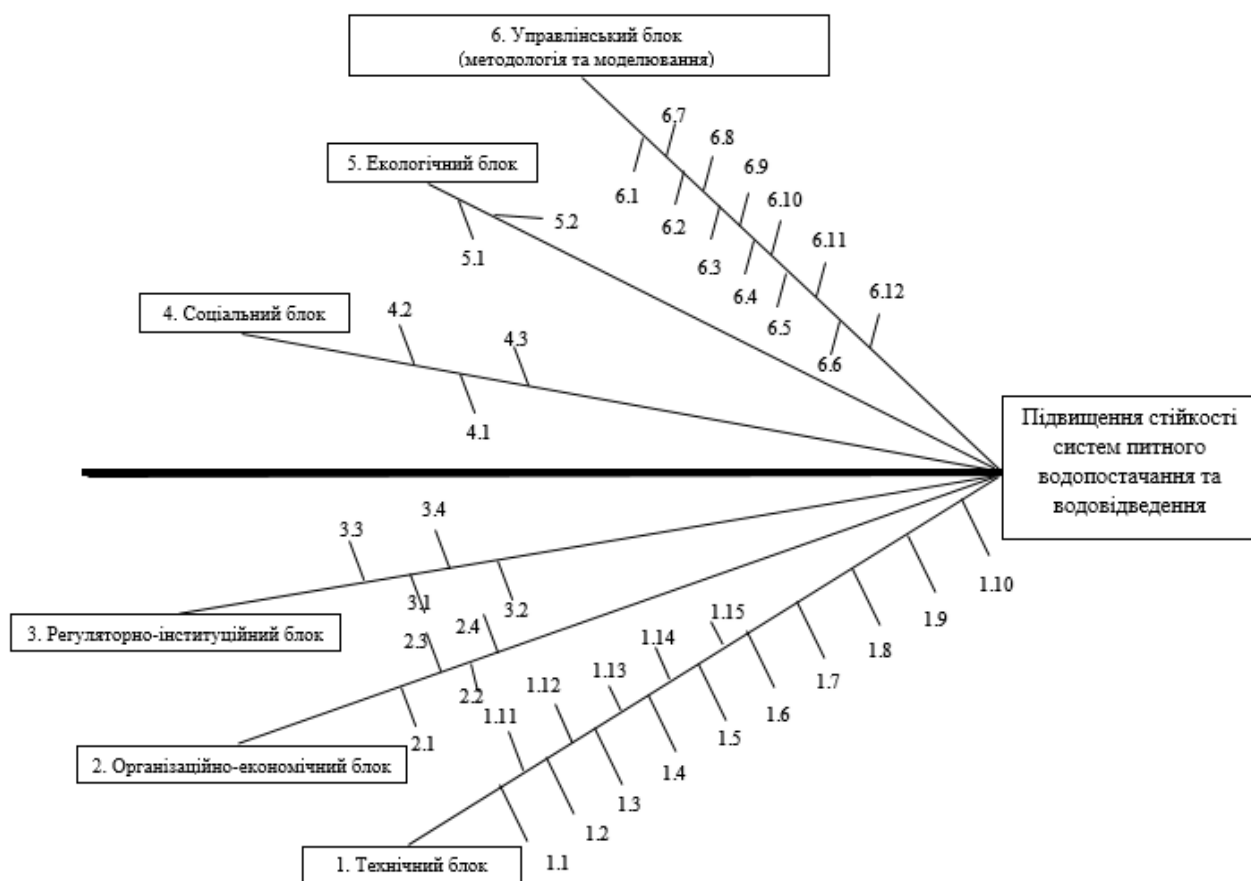


Рисунок 4.3.1. Взаємозв'язок стійкості систем питного водопостачання та водовідведення із заходами щодо її комплексного покращення, оптимізації

Для побудови діаграми причинно – наслідкових зв'язків усі ідентифіковані фактори та заходи було згруповано у 6 основних категорій (гілок діаграми):

Гілка 1. Технічні та експлуатаційні фактори	Гілка 2. Фінансово-економічні фактори
1.1 Високий рівень фізичного зносу обладнання 1.2 Ризики техногенного та природного характеру 1.3 Цілеспрямовані атаки на елементи інженерної інфраструктури 1.4 Мінімізація втрат води 1.5 Зниження енерговитрат 1.6 Максимізація надійності послуг 1.7 Втрати при реалізації ризику (наприклад, прорив труб, відмова насосної станції) 1.8 Прорив магістралі, знеструмлення насосної станції	2.1 Мінімізація експлуатаційних витрат 2.2 Фінансові обмеження 2.3 Тарифи 2.4 Інвестиції

Гілка 1. Технічні та експлуатаційні фактори	Гілка 2. Фінансово-економічні фактори
1.9 Кількість ремонтів на 1 км (як індикатор життєвого циклу) 1.10 Середній вік труб (як індикатор життєвого циклу) 1.11 Втрати в системі (як індикатор життєвого циклу) 1.12 Частка резервованих джерел подачі (як індикатор життєвого циклу) 1.13 Впровадження резервних джерел енергії (дизель-генератори, сонячні панелі) 1.14 Зонування систем за рівнем вразливості 1.15 Впровадження автоматизованих систем моніторингу втрат води	
Гілка 3. Нормативно-правові (регуляторні) фактори	Гілка 4. Соціальні (споживчі) фактори
3.1 Нормативне середовище 3.2 Нормативи 3.3 Повноваження 3.4 Контроль	4.1 Безперервне надання послуг населенню 4.2 Якість надання послуг 4.3 Кількість споживачів
Гілка 5. Фактори зовнішніх ризиків та загроз	Гілка 6. Методологічно-управлінські інструменти
5.1 Техногенні та природні ризики 5.2 Ризики ХБРЯ-забруднень	6.1 Багатокритеріальна модель оцінювання та оптимізації стійкості 6.2 Метод аналізу ієрархій 6.3 Ризик-орієнтоване планування 6.4 Системний аналіз 6.5 Логіко - математичне моделювання 6.6 Математична оптимізація 6.7 Формування ієрархічної структури (мета - критерії - підкритерії - альтернативи) 6.8 Експертне попарне порівняння критеріїв за шкалою Сааті 6.9 Розрахунок ваг w_i 6.10 Прогнозування загроз та превентивне моделювання сценаріїв 6.11 Сценарне планування на випадок повторних атак 6.12 Інтегрована система пріоритизації інвестицій

Таким чином, у цьому підрозділі застосовано метод діаграми Ісікави, що дозволило перейти від простого переліку загроз до жорстко структурованої ієрархії

причинно – наслідкових зв'язків. Виділено шість головних векторів впливу на стійкість систем питного водопостачання та водовідведення: техніко – експлуатаційні, фінансові, нормативні, соціальні, зовнішні (включно з ХБРЯ) та управлінські.

Візуалізація та систематизація факторів доводить, що вирішення проблеми низької стійкості неможливе виключно в технічній площині (Гілка 1). Воно вимагає обов'язкової інтеграції сучасних методологічних інструментів (Гілка 6), таких як метод аналізу ієрархій та ризик – орієнтоване планування.

Розроблена структура причинно – наслідкових зв'язків є логічним продовженням багатокритеріальної моделі (підрозділ 4.2) та слугує основою для формування практичних сценаріїв оптимізації і пріоритизації інвестиційних заходів у кризових умовах.

4.4. Алгоритм сценарного моделювання кризових ситуацій

Зробимо прикладну реалізацію моделі в умовах України. Для переведення запропонованої моделі в площину практичної реалізації доцільно розглянути приклади на рівні державного, регіонального та муніципального управління. У межах України впровадження концептуальної моделі забезпечення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення може базуватись на існуючих викликах і потребах регіонів.

На національному рівні прикладом застосування моделі може стати Державна цільова програма модернізації об'єктів централізованого водопостачання та водовідведення в умовах війни. В рамках цієї програми необхідна розробка і подальше впровадження схем оптимізації систем централізованих водопостачання та водовідведення населених пунктів країни. Наприклад, для зменшення залежності від електропостачання вразливих насосних станцій пропонується впровадження резервних джерел енергії (дизель - генератори, сонячні панелі). В моделі це відображається як управлінське рішення x_1 , яке зменшує ризик відключення ($Loss_1$) і підвищує цільову функцію $R(S)$ через зростання надійності.

На регіональному рівні після масштабних руйнувань у 2022 - 2024 роках

прикладом може бути регіональна стратегія області, яка адаптована під ризик - орієнтовану модель. В рамках цієї стратегії необхідна розробка і подальше впровадження схем оптимізації систем централізованих водопостачання та водовідведення населених пунктів області. Для впровадження необхідно:

- зонування систем питного водопостачання та водовідведення за рівнем вразливості,
- впровадження автоматизованих систем моніторингу втрат води,
- реалізація сценарного планування на випадок повторних атак.

На муніципальному рівні прикладом може бути розробка та впровадження схем оптимізації централізованих систем водопостачання та водовідведення населеного пункту. В рамках цих схем буде заплановано і, в подальшому, реалізовано впровадження в місті інтегрованої системи пріоритизації інвестицій, яка базується на методі аналізу ієрархій. Для оцінки доцільності модернізації окремих ділянок мереж застосовується експертне опитування за критеріями: ризик прориву, енергоспоживання, кількість споживачів. Розраховані вагові коефіцієнти дозволяють обґрунтувати черговість реконструкції об'єктів - насосної станції, ділянки магістрального водогону тощо.

Прикладом агрегованої оцінки стійкості ($R(S)$) може бути практичний розрахунок інтегральної стійкості систем питного водопостачання та водовідведення в місті, де можуть бути використані такі вагові коефіцієнти:

- $w_1 = 0,3$ (мінімізація втрат води),
- $w_2 = 0,25$ (зниження енерговитрат),
- $w_3 = 0,2$ (надійність послуг),
- $w_4 = 0,15$ (мінімізація експлуатаційних витрат),
- $w_5 = 0,1$ (ризик надзвичайних ситуацій).

Після оптимізації вектору рішень X система досягає збільшення показника $R(S)$ з 0,61 до 0,79, що відповідає значному підвищенню функціональної стійкості.

Під час формування індикаторів за життєвим циклом у місті в межах схеми оптимізації систем централізованого водопостачання можуть бути впроваджені показники для всіх стадій життєвого циклу водопровідних мереж: кількість ремонтів

на 1 км, середній вік труб, втрати в системі, частка резервованих джерел подачі. Це дозволяє формалізувати цілі технічного блоку та вбудувати їх у інтегровану модель оцінки стійкості.

Зробимо приклад практичного наповнення схеми оптимізації систем централізованих водопостачання та водовідведення, який буде побудований на вищеписаних концептуальних та математичних моделях, що трансформуються в конкретні заходи, спрямовані на підвищення стійкості інфраструктури в умовах надзвичайних ситуацій та у воєнний час.

На основі ризик - орієнтованого планування проведемо аналіз потенційних подій, які можуть призвести до часткового або повного припинення надання послуг.

Визначимо основні фактори та відповідні негативні сценарії:

1. Зупинка централізованого водопостачання та/або водовідведення:

1.1 Часткове або повне руйнування об'єктів систем (водозаборів, очисних споруд, насосних станцій, магістральних трубопроводів).

1.2 Часткове або повне знеструмлення об'єктів, що унеможлиблює роботу насосного обладнання та очисних систем.

1.3 Блокування доступу персоналу до ключових об'єктів для проведення ремонту та обслуговування.

1.4 Відсутність достатньої кількості води у джерелі водопостачання внаслідок природних або техногенних причин.

2. Неможливість забезпечення гарантованої якості питної води:

2.1 Погіршення якості води у джерелі через антропогенні, техногенні чи кліматичні фактори.

2.2 Хімічне, біологічне, радіаційне або ядерне забруднення джерела водопостачання або безпосередньо в системі.

2.3 Недоступність основного джерела водопостачання, що вимагає переходу на резервне.

Нижче у Таблиці 4.4.1 для кожного ідентифікованого ризику розробимо детальний план дій, що буде практичним втіленням моделі управління. План включає заходи реагування, порядок інформування та альтернативні рішення.

Таблиця 4.4.1

Орієнтовний план дій підприємства питного водопостачання та водовідведення під час виникнення надзвичайних ситуацій та/або у воєнний час

Можливий негативний сценарій	Заходи реагування та попередження	Особи, яких необхідно повідомити, та метод оповіщення	Альтернативний/резервний спосіб забезпечення послуг
1	2	3	4
<u>Сценарій 1:</u> Руйнування або знеструмлення насосної станції першого підйому	1. Негайна активація плану дій у надзвичайних ситуаціях. 2. Оцінка масштабів пошкодження та можливості відновлення. 3. Впровадження резервних джерел енергії (дизель - генератори, сонячні панелі) для живлення критично важливого обладнання.	<i>Кого повідомити:</i> • Керівник підприємства питного водопостачання та водовідведення. • Місцеві органи влади (військова адміністрація). • Територіальний підрозділ ДСНС. • Місцевий відділ охорони здоров'я. <i>Метод оповіщення:</i> • Через офіційні канали місцевої влади (сайт, соцмережі). • SMS-інформування, радіо, телебачення. • Залучення голів ОСББ/квартальних для адресного інформування.	1. Організація підвозу питної води водовозами до визначених пунктів роздачі. 2. Використання резервних/альтернативних джерел водопостачання (свердловини, буюети) за умови підтвердження безпечності води. 3. Створення складу пакетованої/бутильованої води для вразливих груп населення.
<u>Сценарій 2:</u> Хімічне, біологічне, радіаційне або ядерне забруднення джерела питного водопостачання	1. Негайне припинення забору води із забрудненого джерела. 2. Терміновий відбір проб води для лабораторного аналізу у співпраці з органами нагляду. 3. Посилення режиму знезараження на водоочисних спорудах (якщо це технічно можливо і доцільно). 4. Проведення моделювання розповсюдження забруднюючих речовин в мережі.	<i>Кого повідомити:</i> • Негайно: органи нагляду, ДСНС, місцеві органи влади. <i>Метод оповіщення:</i> • Сигнали цивільного захисту. • Термінове інформування населення усіма доступними каналами про категоричну заборону використання води з-під крана для пиття та приготування їжі. • Надання чітких інструкцій щодо подальших дій.	1. Перехід на резервне (дублююче) джерело водопостачання, якщо таке передбачено схемою оптимізації. 2. Організація централізованого забезпечення населення питною водою гарантованої якості (бутильованою, привізною). 3. Розгортання мобільних установок для очищення води у визначених безпечних місцях.

Сценарій 3: Масштабний прорив магістрально-го водогону або каналіза-ційного колек-тора	1. Локалізація аварійної ділянки шляхом перекриття засувок. 2. Оцінка часу, необхідного на проведення ремонтних робіт. 3. Проведення дезінфекції ділянки мережі після завершення ремонту. 4. Для каналізаційних мереж: вжиття заходів для мінімізації екологічної шкоди від витоку стічних вод.	<i>Кого повідомити:</i> • Аварійно-диспетчерська служба підприємства. • Споживачі, які потрапили у зону відключення. • У разі витоку стічних вод - екологічна інспекція. <i>Метод оповіщення:</i> • Інформування про тимчасове припинення надання послуг та орієнтовні терміни відновлення.	1. Забезпечення тимчасового водопостачання за рахунок переключення на інші ділянки мережі (якщо дозволяє гідравлічна модель). 2. Організація тимчасового підвозу води для споживачів, що залишилися без водопостачання. 3. Для водовідведення: використання мобільних насосних станцій для перекачування стоків в обхід аварійної ділянки.
--	--	--	--

Представлений у Таблиці 4.4.1 приклад демонструє, як загальна концептуальна модель підвищення стійкості, що базується на системному аналізі, ризик - орієнтованому плануванні та математичній оптимізації, може бути декомпозована до рівня конкретних, практичних та документованих планів дій. Така деталізація в межах схем оптимізації є обов'язковою умовою для переходу від теоретичних розробок до реального підвищення безпеки та стійкості систем питного водопостачання та водовідведення, особливо в умовах воєнного стану та надзвичайних ситуацій.

Таким чином, у цьому підрозділі здійснено прикладну реалізацію розробленої логіки – математичної моделі, яка дозволяє перевести абстрактні показники стійкості у площину практичного державного, регіонального та муніципального управління. Доведено, що використання методу аналізу ієрархій з відповідними ваговими коефіцієнтами (w_i) забезпечує об'єктивну пріоритизацію інвестицій та здатне підвищити функціональну стійкість системи (інтегральний показник $R(S)$) з 0,61 до 0,79.

Сформовано конкретизований алгоритм сценарного моделювання кризових ситуацій, який враховує повний спектр потенційних загроз (техногенні аварії, блекаути, руйнування, ХБРЯ-забруднення) та пропонує готові протоколи реагування, оповіщення та резервного забезпечення послуг (Таблиця 4.4.1).

Доведено, що загальна концептуальна модель підвищення стійкості, яка базується на системному аналізі та ризик – орієнтованому плануванні, має бути обов'язково декомпозована до рівня документованих планів дій. Така деталізація в межах розробки схем оптимізації систем централізованих водопостачання та водовідведення є ключовою умовою для забезпечення національної та екологічної безпеки в умовах воєнного стану.

4.5. Висновки до розділу 4

У четвертому розділі дисертаційного дослідження виконано теоретичне узагальнення, логіко – математичну формалізацію та прикладну реалізацію комплексної наукової задачі щодо підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення в умовах підвищених ризиків воєнного, техногенного та екологічного характеру. Отримані результати дозволяють сформулювати такі основні висновки:

1. Науково обґрунтовано перехід до нової парадигми управління системами питного водопостачання та водовідведення, яка базується на концепції резильєнтності (стійкості) інфраструктури критичного життєзабезпечення. Доведено, що класичні однокритеріальні підходи, орієнтовані на статичну надійність в мирний час, є недостатніми для протидії каскадним аваріям та цілеспрямованим деструктивним впливам. Запропоновано розглядати стійкість як динамічну здатність системи адаптуватися, мінімізувати вразливість, зберігати базові функції за рахунок резервування та оперативно відновлювати нормативні параметри експлуатації після збоїв.

2. Здійснено логіко – математичну формалізацію задачі підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення як багатовимірної багатокритеріальної проблеми. Побудовано концептуальний простір параметрів, що охоплює вектор поточного експлуатаційно – технічного стану інфраструктури (S), множину допустимих керованих рішень (X), стохастичний вектор некерованих зовнішніх збурень воєнного часу та ХБРЯ – ризиків (P), а також систему жорстких фінансових, нормативних та гідравлічних обмежень (C). Глобальну мету

формалізовано як максимізацію інтегрального індексу стійкості:
 $\max R(S) = f(Z(X, P))$.

3. Розроблено та структуровано матрицю об'єктивного конфлікту цільових критеріїв оптимізації, яка наочно ілюструє суперечливість між необхідністю досягнення максимальних технологічних показників (енергетичної автономності мереж C_e , мінімізації часу відновлення C_t , санітарно – хімічної безпеки C_{safe}) та жорсткими фінансовими обмеженнями підприємств (CAPEX / OPEX). Доведено, що розв'язання цього конфлікту та пошук компромісних (Парето – оптимальних) рішень потребує обов'язкового застосування методів скаляризації векторних критеріїв за допомогою вагових коефіцієнтів функцій корисності.

4. Застосовано метод діаграми Ісікави для систематизації та декомпозиції причинно – наслідкових зв'язків ризиків низької стійкості інфраструктури. Усі ідентифіковані фактори та превентивні заходи жорстко структуровано за шістьма логічними гілками (технічні, фінансово – економічні, нормативно – правові, соціальні, фактори зовнішніх загроз та методологічно – управлінські інструменти). Це дозволило науково підтвердити, що стабілізація критичного стану систем питного водопостачання та водовідведення не може бути досягнута суто інженерними заходами, а вимагає впровадження ризик – орієнтованого сценарного планування та системного аналізу.

5. Розроблено алгоритм сценарного моделювання кризових ситуацій на державному, регіональному та муніципальному рівнях управління. На основі методу аналізу ієрархій (за шкалою Сааті) обчислено систему вагових коефіцієнтів для інтегральної оцінки стійкості, де найбільшу значущість отримали критерії мінімізації втрат води ($w_1 = 0,3$) та зниження енерговитрат ($w_2 = 0,25$). Практичні розрахунки довели, що превентивна оптимізація вектору рішень X (впровадження локальних очисних систем, сорбційних бар'єрів на базі порошкоподібного активованого вугілля – ПАВ, та автономних джерел живлення) забезпечує зростання інтегрального показника стійкості системи $R(S)$ з 0,61 до 0,79.

6. Сформовано прикладний орієнтовний план дій підприємства питного водопостачання та водовідведення під час виникнення надзвичайних ситуацій та у

воєнний час, що є безпосереднім втіленням розробленої логіко – математичної моделі. У плані деталізовано заходи реагування, протоколи міжустановочного інформування та альтернативні способи забезпечення послуг (використання мобільних станцій очищення, розгортання автономних насосних вузлів) для типових деструктивних сценаріїв (тотальний блекаут, фізичне руйнування об'єктів першого підйому, ХБРЯ – зараження джерела). Отримані результати повністю відповідають вимогам Закону України «Про критичну інфраструктуру» та новим Порядкам.

РОЗДІЛ 5. ТЕХНІКО – ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІНВЕСТИЦІЙНИХ ПРІОРИТЕТІВ МОДЕРНІЗАЦІЇ СИСТЕМ ПИТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ВОДОВІДВЕДЕННЯ

5.1. Математичне моделювання вартості життєвого циклу схеми оптимізації систем питного водопостачання та водовідведення

Ефективна практична реалізація технічних рішень, обґрунтованих у межах оптимального сценарію розвитку систем питного водопостачання та водовідведення, критично залежить від якості розробленого фінансово – економічного інструментарію. Сучасні умови відновлення муніципальної інфраструктури України характеризуються дефіцитом місцевих бюджетів та високим ступенем макроекономічної невизначеності. Це унеможливорює використання застарілих статичних кошторисних підходів і вимагає впровадження динамічного фінансового моделювання.

Відповідно до вимог затверджених Порядків, фінансова модель є обов’язковою складовою інвестиційного планування систем питного водопостачання та водовідведення. Вона розробляється на розрахунковий період до 10 років (що корелює з національними цільовими програмами, такими як «Екостоки») та інтегрує капітальні витрати (CAPEX), експлуатаційні витрати (OPEX), а також диверсифіковані канали надходження капіталу.

В основу розробленого методичного підходу до фінансового моделювання покладено концепцію вартості життєвого циклу (Life Cycle Costing – LCC) об’єктів критичної інфраструктури. Математична оцінка сумарних витрат (LCC) на впровадження інженерного заходу розраховується за формулою:

$$LCC = CAPEX_0 + \sum_{t=1}^T \frac{OPEX_t + Crisk(t) \cdot (1 - Rs)}{(1+r)^t} \quad (5.1.1)$$

де:

$CAPEX_0$ – першочергові капітальні інвестиції у проєктування, закупівлю та будівельно – монтажні роботи;

$OPEX_t$ – експлуатаційні витрати t -го року (енергоспоживання, реагенти, оплата праці, поточні ремонти);

r – дисконтна ставка (враховує інфляційні ризики);

T – термін планування (роки);

$C_{risk}(t)$ – потенційні фінансові збитки підприємства від ліквідації масштабної аварії або зупинки системи у разі настання кризової ситуації (блекауту) в момент часу t ;

R_s – інтегрований індекс стійкості системи ($0 \leq R_s \leq 1$).

Для оцінки доцільності залучення кредитних та грантових коштів під заходи з підвищення резильєнтності розраховується адаптований чистий дисконтований дохід (NPV_{res}), який враховує не лише прямий комерційний прибуток, а й фінансовий еквівалент попереджених втрат (економію від ліквідації прихованих витоків, зниження питомого енергоспоживання насосів та уникнення штрафів за екологічне забруднення):

$$NPV_{res} = \sum_{t=1}^T \frac{\Delta CF_t + C_{(risk)}(t) \cdot (1 - R_s)}{(1+r)^t} - CAPEX_0 \quad (5.1.2)$$

де:

ΔCF_t – чистий приріст грошового потоку у році t за рахунок реалізації оптимізаційних заходів.

Специфіка відновлення критичної інфраструктури вимагає побудови багатоканальної архітектури фінансування. Модель передбачає чіткий розподіл капітальних інвестицій між п'ятьма основними джерелами, як показано нижче у Таблиці 5.1.1, залежно від рівня пріоритетності заходів.

Таблиця 5.1.1

Структура та умови залучення джерел фінансування для реалізації схеми оптимізації

Джерело фінансування	Вартість / Умови	Цільове призначення в схемі оптимізації	Прив'язка до пріоритету (бали)
Міжнародні фінансові організації (Світовий банк, ЄІБ, ЄБРР, НЕФКО)	Довгострокові кредити (15–25 років), $r = 2\text{--}4\%$ річних у євро	Масштабна модернізація очисних споруд (КОС), повна реконструкція магістральних мереж	Високий пріоритет (700 – 900 балів)
Міжнародна технічна та грантова допомога (UNICEF, GIZ, JICA, IOM)	Безповоротні кошти (0%), жорсткий цільовий аудит	Впровадження систем ХБРЯ-безпеки, закупівля мобільних станцій, розробка «цифрових двійників» (ГІС)	Надзвичайно важливі (900 – 1000 балів)
Державний бюджет / Програми модернізації	Цільові субвенції, співфінансування від 20%	Об'єкти спільного користування громад, ліквідація наслідків прямого руйнування інфраструктури	Надзвичайно важливі та високі (800 – 1000 балів)
Місцевий бюджет громади	Власні податкові надходження	Розробка проєктно – кошторисної документації, співфінансування грантових угод, ліквідація локальних вузьких місць	Усі рівні (забезпечення старту проєктів)
Власні кошти підприємства (тарифна складова, інвестпрограма)	Амортизаційні відрахування, кошти у межах дозволеного тарифу	Встановлення ЧРП, заміна запірної арматури, капітальний ремонт локальних ділянок мережі	Середній та низький пріоритет (0 – 600 балів)

Для координації потоків капіталу розроблено загальну схему взаємодії та консолідації фінансових ресурсів (Рисунок 5.1.1), що базується на матричному принципі розподілу коштів.

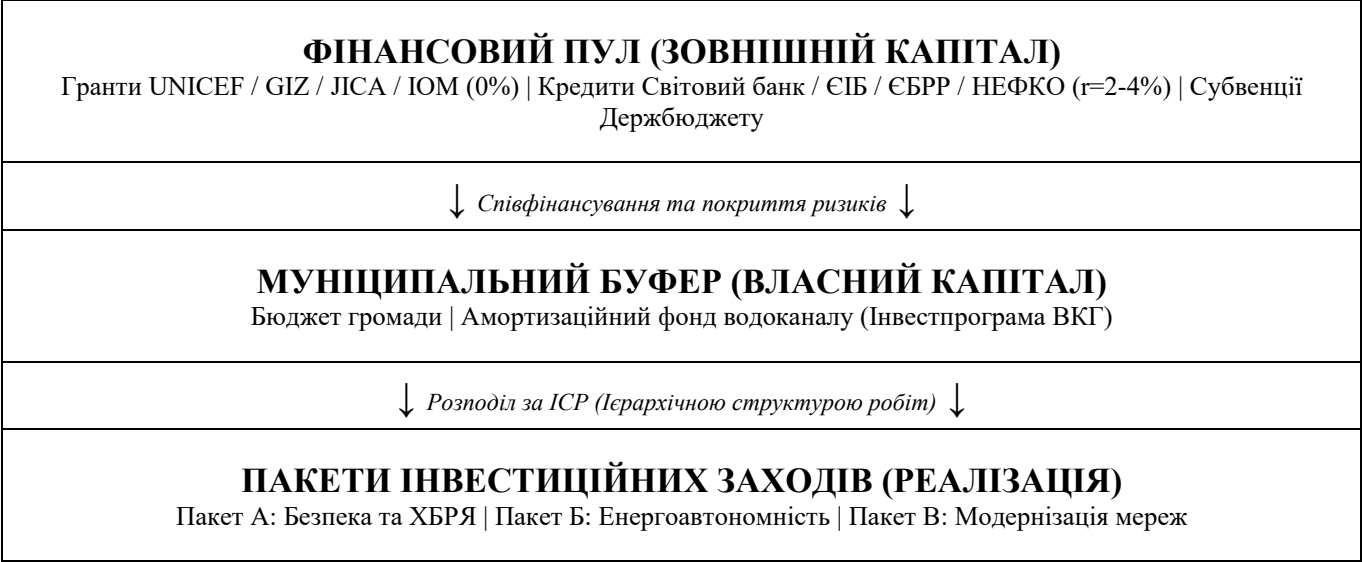


Рисунок 5.1.1. Схема консолідації та спрямування диверсифікованих фінансових потоків у моделі схеми оптимізації

Враховуючи кризові умови, розроблена фінансова модель підлягає обов’язковому стрес – тестуванню. Оцінюється стійкість моделі до трьох критичних факторів ризику:

- 1) зростання вартості будівельних матеріалів та обладнання (CAPEX +20%);
- 2) підвищення вартості електроенергії (ОРЕХ енергоскладової +30%);
- 3) затримка фінансування від донорів або МФО на термін понад 1 рік.

Таблиця 5.1.2

Матриця аналізу чутливості та фінансової стійкості інвестиційних пакетів

Інвестиційний пакет	Базове значення NPV (млн грн)	Сценарій 1: CAPEX +20%	Сценарій 2: Електроенергія +30%	Сценарій 3: Затримка фінансування (1 рік)
Пакет А (Безпека та ХБРЯ)	+45.2	+32.1	+41.8	+12.4
Пакет Б (Енергоавтономність та ЧРП)	+120.8	+94.5	+148.2*	+88.1
Пакет В (Реконструкція мереж)	+68.4	+11.2	+54.6	+34.2

*Примітка: Прискорене зростання вартості електроенергії підвищує економічну ефективність

(NPV) Пакета Б, оскільки впровадження ЧРП та енергоефективного обладнання генерує більший обсяг відносного фінансового заощадження.

Аналіз матриці чутливості доводить, що заходи з енергоавтономності мають найвищий рівень фінансового імунітету до ринкових шоків, тоді як лінійні проєкти заміни мереж (Пакет В) є високочутливими до інфляційного зростання вартості трубної продукції (CAPEX), що підтверджує доцільність пріоритизації технологічних компонентів на перших етапах реалізації схем оптимізації.

Таким чином, у цьому підрозділі науково обґрунтовано архітектуру динамічної фінансової моделі реалізації схем оптимізації централізованих систем водопостачання та водовідведення, яка базується на методології оцінки вартості життєвого циклу (LCC) та адаптованого показника NPV_{res} , що дозволяє враховувати вартісний ефект від мінімізації безпекових і технологічних ризиків.

Розроблено багатоканальну матрицю диверсифікації джерел фінансування, яка чітко гармонізує вартість залученого капіталу (кредити МФО, безповоротні гранти, муніципальні субвенції та тарифні фонди) із пріоритетністю інвестиційних заходів, мінімізуючи навантаження на кінцевого споживача.

На основі проведеного стрес – тестування та аналізу чутливості доведено високу фінансову стійкість технологічних пакетів модернізації насосного обладнання (ЧРП) в умовах нестабільних ринків енергоносіїв, що виступає економічним підтвердженням закладеного в нормативні Порядки ризик – орієнтованого підходу.

5.2. Критеріальна адаптація та оцінка інвестиційної зрілості інфраструктурних проєктів за міжнародними стандартами

Масштабне відновлення та модернізація систем питного водопостачання та водовідведення в Україні потребує залучення значних фінансових обсягів від міжнародних фінансових організацій (МФО), таких як Світовий банк, Європейський банк реконструкції та розвитку (ЄБРР), Європейський інвестиційний банк (ЄІБ), а також міжнародних донорів (UNICEF, GIZ, JICA, NEFCO). Проте практика показує, що традиційна вітчизняна проєктно – кошторисна документація, сформована

виключно за національними будівельними нормами, не повною мірою відповідає жорстким критеріям оцінки проєктів, що застосовуються МФО.

У зв'язку з цим, у межах розроблених за участю автора Порядків, було нормативно закріплено методологію адаптації інженерних рішень до міжнародних стандартів. Цей підхід дає змогу трансформувати технічні заходи оптимального сценарію у верифіковані інвестиційні пакети на стадіях допроєктного обґрунтування та комплексного аудиту.

Міжнародні донори оцінюють інфраструктурні проєкти не лише з погляду локальної інженерної доцільності, а й через призму екологічних, соціальних та управлінських стандартів, а також екологічних та соціальних критеріїв.

Запропонована методологія передбачає гармонізацію розроблених технічних рішень із чотирма базовими вимірами вимог МФО, які представлені нижче у Таблиці 5.2.1.

Таблиця 5.2.1

Матриця відповідності компонентів схеми оптимізації вимогам МФО

Цільовий критерій МФО	Суть міжнародної вимоги	Реалізація в запропонованій методології (згідно з Порядками)
Екологічна та соціальна безпека	Оцінка впливу на довкілля (ОВД) протягом усього життєвого циклу; мінімізація вуглецевого сліду.	Обов'язкове екологічне обґрунтування заходів; перехід на безхлорні технології та мінімізацію скидів забруднюючих речовин.
Технологічна резильєнтність	Здатність об'єкта протидіяти кліматичним змінам та екстремальним загрозам техногенного характеру.	Сценарне моделювання каскадних відмов, блекаут – тестування та симуляція ХБРЯ – загроз у розрахунковому ядрі EPANET/QGIS.
Економічна спроможність	Доведена ефективність інвестицій через індикатори внутрішньої норми доходності та вигоди для громади.	Розрахунок модифікованого показника NPV _{res} , який монетизує попереджені збитки та підвищення стійкості.
Прозорість закупівель	Типізація обладнання, виключення монопольних специфікацій, можливість міжнародних торгів.	Формування переліку заходів за принципом ІСР (ієрархічної структури робіт) із чітким виділенням лотів закупівлі.

Для доведення МФО доцільності фінансування безпекових та протиаварійних заходів, які не генерують прямого комерційного прибутку, автором запропоновано модель розрахунку модифікованого коефіцієнта вигоди – витрат з урахуванням резильєнтності:

$$BCR_{res} = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{B_{dir,t} + B_{res,t}}{(1+r)^t}}{\sum_{t=0}^T \frac{CAPEX_t + OPEX_t}{(1+r)^t}} \quad (5.2.1)$$

де:

$B_{dir,t}$ – пряма економічна вигода від заходу у році t (заощадження електроенергії, зменшення витоків води);

$B_{res,t}$ – капіталізована вартість попереджених ризиків у році t (розрахована через зниження індексу ризику ΔRI та уникнення витрат на ліквідацію надзвичайних ситуацій, підвезення води та штрафів);

$CAPEX_t$, $OPEX_t$ – відповідно капітальні та експлуатаційні витрати проєкту;

r – соціальна ставка дисконтування, що вимагається МФО (зазвичай 6–10% для інфраструктурних проєктів розвитку).

Проєкт вважається безумовно рекомендованим до міжнародного співфінансування, якщо обчислене значення $BCR_{res} \geq 1,25$ в умовах проведення аналізу чутливості базових параметрів.

Процес узгодження інженерних рішень із вимогами міжнародних партнерів носить циклічний характер і реалізується за двоетапною схемою (Рисунок 5.2.1), інтегрованою у загальну структуру розроблення схем оптимізації.

Така циклічність дозволяє оперативно коригувати інженерні параметри лотів на основі зворотного зв'язку від експертів МФО без порушення загальної архітектури схеми оптимізації. Завдяки послідовному переходу від суто технічного проєктування до екологічного та фінансового скринінгу, громада отримує валідований інструмент превентивного ризик – менеджменту. Результатом завершення цього циклу є

формування банківського інвестиційного пакета, який мінімізує часові бар'єри при проходженні міжнародного аудиту та гарантує відкриття фінансування для модернізації об'єктів критичної інфраструктури в умовах високого ступеня невизначеності.

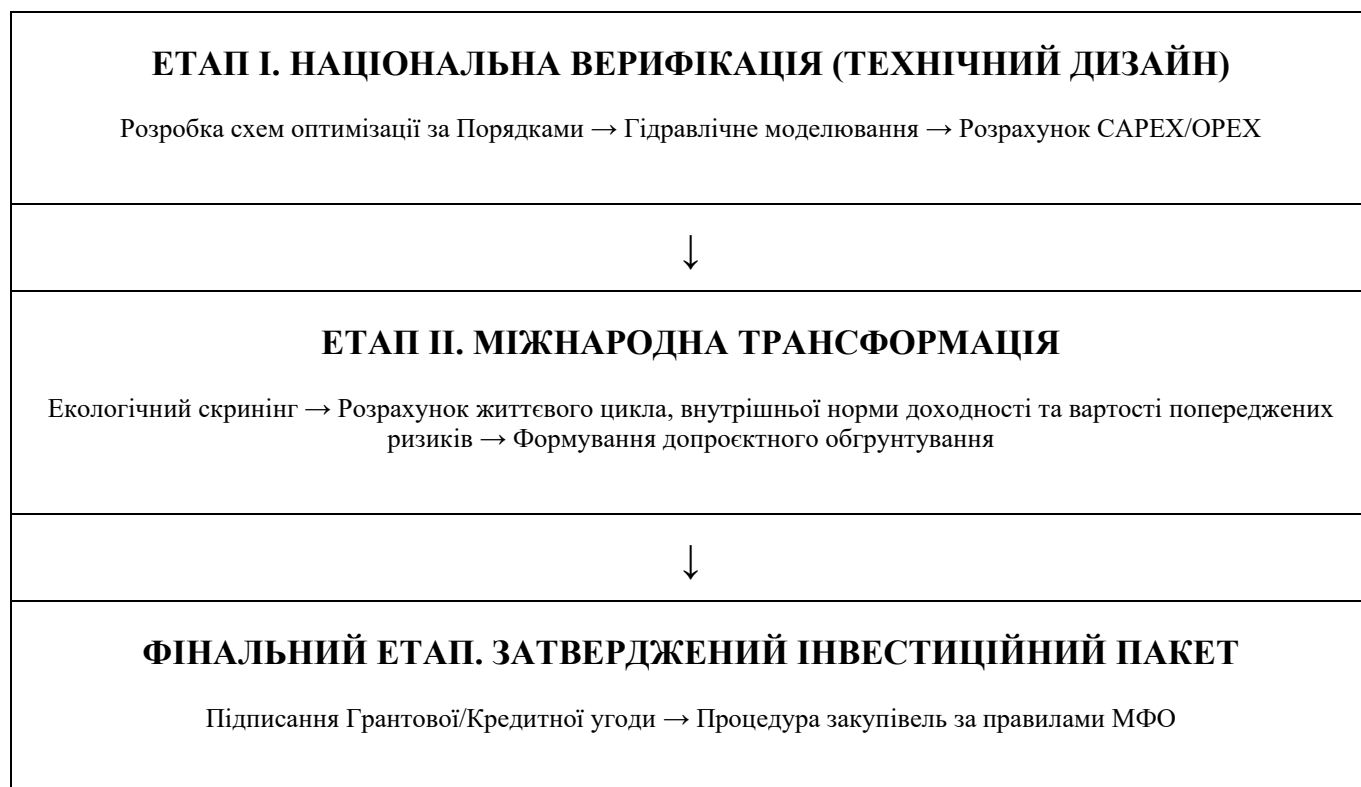


Рисунок 5.2.1. Схема інтегрованого циклу адаптації проєктних рішень схем оптимізації до вимог міжнародних донорів

Практичне впровадження модифікованого коефіцієнта BCR_{res} вимагає не лише математичних розрахунків, а й суворої інституційної та проєктної готовності з боку комунального підприємства та територіальної громади. Оскільки МФО застосовують поетапний скринінг фінансових ризиків, виникає об'єктивна потреба у квантифікації якісних показників розробленої документації для визначення її прохідного балу. Для оцінки ступеня готовності інвестиційних пакетів до подання на розгляд МФО в межах дослідження розроблено критеріальну матрицю зрілості, яку представлено нижче у Таблиці 5.2.2.

Таблиця 5.2.2

Матриця оцінки зрілості та готовності інфраструктурних проєктів питного водопостачання та водовідведення

Рівень зрілості проєкту	Технічний статус (ГІС / Моделювання)	Фінансово-екологічний статус	Статус закупівлі	Можливість фінансування
Низький (Концептуальний)	Відсутня електронна модель; граф мережі не оцифрований; гідравлічні розрахунки застарілі.	Оцінка вартості виконана укрупнено за аналогами; екологічний скринінг відсутній.	Відсутня ІСР; команда управління не сформована.	Відхилення. Потребує повного доопрацювання в межах схеми оптимізації.
Середній (Технічно готовий)	Створено цифровий граф у ГІС; базова гідравлічна модель розроблена, але не відкалібрована.	Розраховано базовий CAPEX/OPEX; розпочато процедуру національної ОВД.	Заходи згруповано за напрямками без деталізації лотів.	Умовне схвалення. Можливе залучення грантів.
Високий	Наявний відкалібрований «цифровий двійник» (похибка $\leq 10\%$); проведено сценарне моделювання ХБРЯ та блекаут-тести.	Обчислено LCC; доведено показники NPV_{res} та $BCR_{res} \geq 1,25$; отримано висновок ОВД.	Побудовано ІСР; визначено 1000-бальний пріоритет; підготовлено специфікації під міжнародні торги.	Безумовне схвалення. Проєкт готовий до відкриття фінансування та підписання угод.

Впровадження цієї критеріальної оцінки у практику розроблення схем оптимізації дозволяє містам України уникати тривалих затримок на стадії експертизи проєктів МФО, забезпечуючи швидкий перехід від стратегічного планування до фізичного виконання робіт на об'єктах критичної інфраструктури.

Таким чином, у цьому підрозділі науково обґрунтовано та нормативно формалізовано методологічний підхід до комплексної адаптації інженерних рішень у схемах оптимізації централізованих систем водопостачання та водовідведення до специфічних вимог і стандартів міжнародних фінансових організацій та донорів.

Запропоновано модифіковану математичну модель оцінки ефективності інвестицій через коефіцієнт BCR_{res} . На відміну від стандартних комерційних індикаторів, вона враховує капіталізовану вартість підвищення резильєнтності критичної інфраструктури, що дозволяє успішно захищати перед МФО доцільність фінансування протиаварійних та безпекових об'єктів.

Розроблено та впроваджено матрицю інституційної зрілості інфраструктурних проєктів питного водопостачання та водовідведення, яка виступає ефективним інструментом експрес – оцінки інвестиційних пакетів громад, мінімізує часові бар'єри при проходженні міжнародних процедур та гарантує залучення фінансування за принципом «Відбудувати краще ніж було».

5.3. Висновки до розділу 5

1. Розроблено фінансову модель реалізації схем оптимізації з урахуванням різних джерел фінансування. Створено критеріальну матрицю зрілості та готовності інфраструктурних проєктів, яка забезпечує комплексну адаптацію інженерних рішень до вимог міжнародних фінансових організацій та донорів для успішного залучення інвестицій.

2. Доведено, що адаптація схем оптимізації до вимог МФО трансформує їх із внутрішньодержавного технічного документа у повноцінне інвестиційне портфоліо громади. Використання науково обґрунтованої моделі стійкості дозволяє Україні ефективно комунікувати з міжнародними партнерами, доводячи доцільність фінансування проєктів «Ukraine FIRST» та інших програм модернізації критичної інфраструктури, що базуються на принципах енергонезалежності та безпеки.

3. Доведено, що використання класичних методів оцінки ефективності інвестицій без врахування витрат на ліквідацію каскадних технологічних відмов призводить до спотворення реальної вартості життєвого циклу систем питного

водопостачання та водовідведення.

4. Модифіковано математичну модель оцінки LCC шляхом введення ймовірнісного чинника ризику та адаптивного індексу резильєнтності, що дозволяє пріоритизувати капітальні вкладення громад.

5. Розрахований інтегрований економічний ефект від реалізації запропонованих схем оптимізації доводить зниження загальних експлуатаційних витрат муніципальних підприємств на 15–22% за рахунок стабілізації гідравлічних режимів та оптимізації реагентного господарства.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено теоретичне узагальнення та нове вирішення наукової задачі підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення, що виявляється у розробленні комплексу методів, моделей та алгоритмів для переходу від реактивного ліквідування наслідків аварій до превентивного ризик – орієнтованого управління функціональним станом критичної інфраструктури.

За результатами проведених досліджень сформульовано наступні основні висновки.

1. Виконано комплексний аналіз сучасного стану систем питного водопостачання та водовідведення України в умовах воєнного стану та встановлено, що традиційні підходи, орієнтовані на статичну надійність, є неефективними проти каскадних відмов. Виявлено й класифіковано ключові загрози функціонуванню інфраструктури (руйнування лінійних елементів, тривалі блекауты, реагентні дефіцити). Науково обґрунтовано специфіку ХБРЯ – ризиків (хімічних, біологічних, радіаційних, ядерних) для відкритих і підземних джерел муніципального водозабору, що дозволило локалізувати критичні області вразливостей технологічних вузлів.

2. Розроблено логіко – математичну формалізацію задачі підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення як складної багатокритеріальної проблеми прийняття рішень в умовах невизначеності. Сформовано цілісну концептуальну модель, яка базується на чотирьох фундаментальних векторах: системній резильєнтності, ієрархічності публічного управління (держава – регіон – громада), орієнтації на повний життєвий цикл інфраструктури та комплексному врахуванні техніко – економічних, правових та екологічних чинників.

3. Побудовано логіко – математичну модель оцінки та інтегральний індекс стійкості $R(S)$ систем питного водопостачання та водовідведення. Запропонована модель, на відміну від бінарних підходів теорії надійності, дозволяє кількісно оцінювати та прогнозувати час функціональної деградації і швидкість відновлення експлуатаційних параметрів систем питного водопостачання та водовідведення за

різних сценаріїв деструктивного впливу.

4. Розроблено комплексну систему індикаторних показників стійкості систем питного водопостачання та водовідведення, яка виступає інформаційним ядром для проведення технологічного аудиту. Система диференційована за трьома критичними параметрами: втратами води (C_w – ефективність мереж), енергозатратністю (C_e – енергетична стійкість) та часом відновлення після збоїв (C_t – операційна гнучкість), що забезпечує можливість моніторингу параметрів стійкості системи в умовах екстремальних зовнішніх впливів.

5. Сформовано методологію побудови трифакторної матриці ризиків (ймовірність – вразливість – масштаб наслідків). Запропонований інструментарій дозволяє ідентифікувати, класифікувати та ранжувати загрози за 4 зонами інфраструктурної безпеки, забезпечуючи перехід до проактивного планування інвестицій на основі обчислення інтегрального індексу ризику.

6. Науково обґрунтовано інженерний алгоритм вибору адаптивних технологічних рішень для мінімізації наслідків надзвичайних ситуацій. Доведено безальтернативність поетапної відмови від складів газоподібного хлору на користь безпечних методів електролізу, інтеграції автономних джерел живлення (СЕС, генератори) та впровадження енергоефективних «насосів блекауту» з низькими пусковими струмами. Обґрунтовано ефективність децентралізованих модульних установок доочищення води з використанням сорбційних бар'єрів на основі порошкоподібного активованого вугілля для захисту соціальної сфери від каскадних забруднень.

7. Систематизовано та структуровано причинно – наслідкові зв'язки факторів впливу на стійкість систем питного водопостачання та водовідведення шляхом розроблення шестивекторної діаграми Ісікави (техніко – експлуатаційні, фінансово – економічні, нормативно – правові, соціальні, зовнішні ризики та методологічно – управлінські інструменти). Це дозволило перейти від хаотичного емпіричного переліку загроз до жорсткої ієрархічної структури превентивного управління.

8. На основі теоретичних досліджень розроблено алгоритми верифікації моделей у ГІС – середовищі (на базі платформи QGIS) та розрахункового гідравлічного ядра

EPANET. Практична цінність та достовірність результатів підтверджена їх імплементацією у два фундаментальні блоки.

На державному рівні досліджень стали науково – методичним фундаментом для розроблення наказу Мінрозвитку від 12.06.2025 р. № 986, яким затверджено нові Порядки розроблення схем оптимізації систем централізованого водопостачання та водовідведення, впроваджуючи нову нормативну парадигму безпеки в масштабах всієї України.

На муніципальному рівні розроблено та впроваджено Стратегію підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення м. Дніпро на період до 2030 року та План заходів її виконання (на базі КП «Дніпроводоканал»).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андрєєв О. М., Корнєєв М. М., Ковальчук І. В. та ін. Розвиток систем водопостачання та водовідведення населених пунктів: монографія. Київ: КНУБА, 2018. 384 с.
2. Богдан Т. Фінансово-економічні наслідки війни. LB.ua: веб-сайт. URL: https://lb.ua/blog/tetiana_bohdan/550614_finansovo_ekonomichni_naslidki.html (дата звернення: 15.07.2023).
3. Бродський Ю. Б. Системний аналіз та теорія прийняття рішень: навчальний посібник в 3-х частинах. Частина 1: Системологія. Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2022. 92 с.
4. Василенко С. Л., Волков В. М. Надійність і сталість систем водопостачання як складової національної та екологічної безпеки. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2017. Вип. 28. С. 53–59. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/PVVG_2017_28_10 (дата звернення: 15.05.2025).
5. Водна стратегія України на період до 2050 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 09 грудня 2022 р. № 1134-р. База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-%D1%80#Text> (дата звернення: 01.11.2023).
6. Водний кодекс України : Закон України від 06 червня 1995 р. № 213/95-ВР. База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення: 18.04.2026).
7. Гігієнічна оцінка та медико-екологічні аспекти якості питної води в Україні / за ред. А. М. Сердюка. Київ: Медінформ, 2019. 248 с.
8. Глобальний аналіз систем водовідведення та їхньої оптимізації // Global Wastewater Status Report (2022). URL: <https://unu.edu/inweh/tools-and-resources/global-wastewater-status> (дата звернення: 16.12.2024).
9. Гончарук В. В. Наука про воду: монографія. Київ: Наукова думка, 2015. 432 с.
10. Горбань О. М., Бахрушин В. Є. Основи теорії систем і системного аналізу.

Запоріжжя: ГУ «ЗІДМУ», 2011. 204 с.

11. Державні санітарні норми та правила «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною» (ДСанПіН 2.2.4-171-10) : Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 12 травня 2010 р. № 400. База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-10#Text> (дата звернення: 10.01.2026).

12. Досвід реалізації проектів із повторного використання очищених стічних вод // Australian National Water Strategy (2021). URL: <https://www.dcceew.gov.au/water/policy/policy/national-water-agreement> (дата звернення: 16.12.2024).

13. ДСТУ ISO 31000:2018 (ISO 31000:2018, IDT) Керування ризиками. Рекомендації. [Чинний від 2019-01-01]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018. 23 с. URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/dstu_iso_31000_2018.pdf (дата звернення: 13.08.2025).

14. ДСТУ ISO 31000-2018 КР Зіміч СЗД-21 : презентація. Scribd: веб-сайт. URL: <https://www.scribd.com/presentation/705243123/%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3-ISO-31000-2018-%D0%9A%D0%A0-%D0%97%D1%96%D0%BC%D0%B8%D1%87-%D0%A1%D0%97%D0%94-21-pptx> (дата звернення: 13.08.2025).

15. ДСТУ ISO/IEC 27005:2019 Інформаційні технології. Методи захисту. Управління ризиками інформаційної безпеки (ISO/IEC 27005:2018, IDT). [Чинний від 2021-01-01]. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020. База даних «Будстандарт Online». URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=85797 (дата звернення: 18.04.2026).

16. ДСТУ-Н ISO/IEC 31010:2011 Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику (ISO/IEC 31010:2009, IDT). [Чинний від 2013-03-01]. Київ: Мінекономрозвитку України, 2012. URL: https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/iso_31010.pdf (дата звернення: 18.04.2026).

17. Дупляк В., Величко С., Дупляк О. Наслідки руйнування каховського водосховища для зрошення та водопостачання півдня України. Проблеми

водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2023. Вип. 44. С. 19–28. DOI: 10.32347/2524-0021.2023.44.19-28.

18. Закон України «Про водовідведення та очищення стічних вод» від 12.01.2023 № 2887-IX. База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2887-20#Text> (дата звернення: 18.04.2026).

19. Закон України «Про енергетичну ефективність» від 21.10.2021 № 1818-IX. База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text> (дата звернення: 01.11.2023).

20. Закон України «Про житлово-комунальні послуги» від 09.11.2017 № 2189-VIII. База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2189-19#Text> (дата звернення: 18.04.2026).

21. Закон України «Про критичну інфраструктуру» від 16.11.2021 № 1882-IX. База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20#Text> (дата звернення: 18.04.2026).

22. Закон України «Про об'єкти підвищеної небезпеки» від 18.01.2001 № 2245-III. База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2245-14#Text> (дата звернення: 18.04.2026).

23. Закон України «Про питну воду та питне водопостачання» від 12.01.2023 № 2887-IX. База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2918-14#Text> (дата звернення: 01.11.2023).

24. Закон України «Про регулювання містобудівної діяльності» від 17.02.2011 № 3038-VI. База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3038-17#Text> (дата звернення: 18.04.2026).

25. Закон України «Про систему громадського здоров'я» від 06.09.2022 № 2573-IX. База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2573-20#Text> (дата звернення: 18.04.2026).

26. Закон України «Про управління відходами» від 20.06.2022 № 2320-IX. База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2320-20#Text> (дата звернення: 18.04.2026).

27. Зелінський С. Е. Водопостачання та водна безпека у контексті російської

агресії // Міжнародний фонд «Відродження» за фінансової підтримки Швеції. Кропивницький. 2022. 44 с. URL: <https://www.irf.ua/wp-content/uploads/2022/05/vodopostachannya-ta-vodna-bezpeka-u-konteksti-rosijskoyi-agresiyi.pdf> (дата звернення: 16.12.2024).

28. Звіт про прямі збитки інфраструктури та непрямі втрати економіки від руйнувань внаслідок військової агресії Росії проти України станом на червень 2023 року // Громадська організація «Інститут Київська Школа Економіки» в рамках Проекту USAID «Економічна підтримка України». URL: https://kse.ua/wp-content/uploads/2023/09/June_Damages_UKR_-Report.pdf (дата звернення: 01.11.2023).

29. Інформація про енергоефективність і модернізацію систем водопостачання у США. Рекомендації щодо зменшення втрат води та використання інтелектуальних систем обліку // EPA Reports on Drinking Water Infrastructure (2023). URL: <https://www.epa.gov/safewater> (дата звернення: 16.12.2024).

30. Карелін С. Стійкі системи водопостачання. Готовність до надзвичайних ситуацій та умов воєнного стану. Рекомендації для територіальних громад // Агентство США з міжнародного розвитку (USAID), 2022. 19 с. URL: <https://decentralization.gov.ua/uploads/library/file/824/Water-Supply-Resilience.pdf> (дата звернення 01.11.2023).

31. Кодекс України про надра : Закон України від 27.07.1994 № 132/94-ВР. База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/132/94-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення: 18.04.2026).

32. Коваленко О. Війна знищила 35% економіки України – ООН. УНІАН: веб-сайт. URL: <https://www.unian.ua/economics/finance/viy-na-znishchila-35-ekonomiki-ukrajini-onn-12122658.html> (дата звернення: 15.07.2023).

33. Концепція Державної цільової економічної програми енергетичної модернізації підприємств водопостачання та водовідведення, що перебувають у державній або комунальній власності, на період до 2030 року : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 24 листопада 2023 р. № 1082-р. База даних «Законодавство України» / ВР України. URL:

<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1082-2023-%D1%80#n9> (дата звернення: 18.04.2026).

34. Концепція створення державної системи захисту критичної інфраструктури : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 06 грудня 2017 р. № 1009-р. База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1009-2017-%D1%80#n8> (дата звернення: 18.04.2026).

35. Кордиш Д. Є. Напрями вдосконалення механізмів публічного управління якістю послуг водопостачання та водовідведення міста в Україні. Вісник Херсонського національного технічного університету. 2022. Вип. 4(83). С. 138–141. DOI: 10.35546/kntu2078-4481.2022.4.8.

36. Кравченко О., Аргатенко Т., Потапенко С., Куба Т. Забезпечення енергетичної сталості та енергоефективності систем питного водопостачання та водовідведення: роль децентралізованих технологій у кризових ситуаціях. Енерготехнології та ресурсозбереження. 2025. № 85 (4). С. 54–69. DOI: 10.33070/etars.4.2025.04.

37. Кравченко О., Кобилянський В., Аргатенко Т., Нечипор О., Потапенко С. Аналіз ризиків здоров'ю населення через недотримання вимог ДСанПіН 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною». Фітотерапія. Часопис. 2025. № 4. С. 119–132. DOI: 10.3234/2522-9680-2025-4-19.

38. Кравченко О., Куба Т., Потапенко С., Хоружий В., Аргатенко Т., Бакуновський О. Планування та організація децентралізованих систем водопостачання у воєнний період в Україні. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2023. Вип. 44. С. 29–39. DOI: 10.32347/2524-0021.2023.44.29-39.

39. Кравченко О., Потапенко С. Планування відновлення і розвитку систем водопостачання та водовідведення України у післявоєнний час. Водопостачання та водовідведення. Спеціальний випуск, лютий 2023. С. 18–21. URL: <https://ukrvodokanal.in.ua/wp-content/uploads/2023/05/zvitnyj-zhurnal-lyutyj-2023.pdf>.

40. Кравченко О., Потапенко С., Аргатенко Т., Роговська Г. Ризики застосування

газоподібного хлору на водоочисних станціях під час воєнних дій. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2023. Вип. 43. С. 29–35. DOI: 10.32347/2524-0021.2023.43.29-35.

41. Кравченко О., Потапенко С., Куба Т., Аргатенко Т. Вимоги до гідравлічного моделювання мереж водопостачання у воєнний час та для управління ризиками ХБРЯ-забруднень. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2023. Вип. 45. С. 32–38. DOI: 10.32347/2524-0021.2023.45.32-38.

42. Кравченко О., Хоружий В., Каніболоцький В. Особливості експлуатації систем питного водопостачання в умовах воєнного часу. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2022. Вип. 38. С. 18–37. DOI: 10.32347/2524-0021.2022.38.18-37.

43. Купрієнко Д. А. Аналіз сучасних тенденцій розвитку системи управління прикордонною безпекою Європейського Союзу. Честь і закон. 2016. Вип. 1(56). С. 20–25. ISSN 2078-7480. URL: <http://chiz.nangu.edu.ua/article/view/138206/166768>.

44. Курбанова Т., Хомутецька Т. Перспективи удосконалення технологій знезалізнення підземних вод для локальних систем питного водопостачання. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2024. Вип. 48. С. 33–42. DOI: 10.32347/2524-0021.2024.48.33-42.

45. Курбанова Т., Хомутецька Т. Дослідження безреагентного знезалізнення води на очисній установці з багатокомпонентним завантаженням й автоматичним керуванням експлуатаційними режимами. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2025. Вип. 52. С. 47–57. DOI: 10.32347/2524-0021.2025.52.56-66.

46. Лідньов А. План локалізації і ліквідації аварій для об'єктів підвищеної небезпеки. 2022. Про-ОП: веб-сайт. URL: <https://pro-op.com.ua/article/636-plan-lokalzats-likvdats-avary-dlya-obktv-pdvis-hcheno-nebezpeki> (дата звернення: 10.07.2023).

47. Макаренко В., Білик С., Хомутецька Т., Аргатенко Т., Макаренко Ю., Панченко О. Підвищення спротиву корозійно-механічному руйнуванню зварних оболонкових ємностей водонапірних башт. Проблеми водопостачання,

водовідведення та гідравліки. 2022. Вип. 39. С. 33–43. DOI: 10.32347/2524-0021.2022.39.33-43.

48. Макаренко В., Гоц В., Хомутецька Т., Макаренко Ю., Аргатенко Т., Прибисько І., Панченко О. Карбонізація бетону і корозія арматури залізобетонних конструкцій підземних каналізаційних систем. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2021. Вип. 37. С. 47–56. DOI: 10.32347/2524-0021.2021.37.47-56.

49. Макаренко В., Хоружий В., Любенко В., Максимов С. Дослідження впливу біологічної корозії на міцність сталевих конструкцій гідротехнічних споруд тривалої експлуатації в агресивних середовищах. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2021. Вип. 36. С. 27–38. URL: https://scholar.google.com.ua/citations?view_op=view_citation&hl=ru&user=5vG34HMAAAJ&citation_for_view=5vG34HMAAAJ:LPZeul_q3PIC.

50. Малярєнко В. А., Лисак Л. В. Енергетичний менеджмент та аудит на об'єктах житлово-комунального господарства: навчальний посібник. Харків: ХНАДУ, 2019. 216 с.

51. Мартинов С., Клімов С., Кучерова А. Виявлення та оцінка небезпек в системі водопостачання. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2025. Вип. 52. С. 74–80. DOI: 10.32347/2524-0021.2025.52.74-80.

52. Марцелюк Є. М., Чарний Д. В., Левицька В. Д., Марисик С. В. Нові технологічні рішення для систем водопідготовки в сучасних умовах. Меліорація і водне господарство. 2021. Вип. 2. С. 201–209. DOI: 10.31073/mivg202102-303.

53. Матвієнко О. Проблеми математичного моделювання систем водопостачання. Scientific Collection «InterConf+». 2022. № 26(129). С. 374–380. DOI: 10.51582/interconf.19-20.10.2022.040.

54. Національна економічна стратегія на період до 2030 року : Постанова Кабінету Міністрів України від 03 березня 2021 р. № 179. База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/179-2021-%D0%BF#n25> (дата звернення: 18.04.2026).

55. Ніколайчук В. М., Шилук О. В. Підвищення енергоефективності систем

водопостачання. Вісник НУВГП. 2017. Вип. 1(77). URL: <http://ep3.nuwm.edu.ua/xmlui/handle/123456789/10128> (дата звернення: 15.05.2025).

56. Новицький Д. Чому фінансування водоканалів потребують перегляду навіть під час війни. Економічна правда: веб-сайт. URL: <https://www.epravda.com.ua/columns/2022/07/11/689049/> (дата звернення: 10.11.2022).

57. Новицький Д. Як міжнародні організації дають воду постраждалим містам. Економічна правда: веб-сайт. URL: <https://www.epravda.com.ua/columns/2022/12/16/695067/> (дата звернення: 12.02.2023).

58. Огляд інфраструктурних проєктів, спрямованих на покращення водопостачання та водовідведення у країнах ЄС // European Union Regional Development Program (2022). URL: https://ec.europa.eu/regional_policy/ (дата звернення: 16.12.2024).

59. Опис системи «NEWater» у Сінгапурі для повторного використання очищених вод // Singapore Water Sustainability Reports (2022). URL: <https://www.pub.gov.sg/> (дата звернення: 16.12.2024).

60. Оцінка та управління водними ресурсами: навчальний посібник / за ред. В. М. Хорєва. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. 324 с.

61. Порядок здійснення державного моніторингу вод : Постанова Кабінету Міністрів України від 19 вересня 2018 р. № 758. База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/758-2018-%D0%BF#n11> (дата звернення: 18.04.2026).

62. Порядок очищення стічних вод перед скиданням в уразливих зонах : Постанова Кабінету Міністрів України від 02 квітня 2024 р. № 378. База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/378-2024-%D0%BF#n8> (дата звернення: 18.04.2026).

63. Павленко П. М., Філоненко С. Ф., Чередніков О. М., Трейтак В. В. Математичне моделювання систем і процесів: навчальний посібник. Київ: НАУ, 2017. 392 с.

64. Потапенко С., Кравченко О. Аналіз світового досвіду та науково-методичні підходи до оптимізації систем питного водопостачання та водовідведення. Проблеми

водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2025. Вип. 49. С. 25–37. DOI: 10.32347/2524-0021.2025.49.25-37.

65. Потапенко С. П. Формування показників поточного стану та розвитку систем питного водопостачання та водовідведення. Просторовий розвиток / Будівництво та цивільна інженерія. 2025. Вип. 13. С. 374–390. DOI: 10.32347/2786-7269.2025.13.374-390.

66. Потапенко С. П. Моделі вирішення проблеми підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення. Сучасні проблеми архітектури та містобудування. 2025. Вип. 74. С. 482–498. DOI: 10.32347/2077-3455.2025.74.482-498.

67. Потапенко С., Кравченко О. Забезпечення оптимальної роботи систем питного водопостачання та водовідведення під час війни. Енергоощадні машини і технології : матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 22–24 травня 2024 р.). Київ: КНУБА, 2024. С. 52–55. URL: <https://drive.google.com/file/d/1KQHEqH8PTxV0VgoRR-YCOneQAQ4TnchU/view>.

68. Потапенко С. Управління стійкістю систем питного водопостачання та водовідведення в умовах сучасних викликів. Advanced Technologies in Scientific Research: Collection of Scientific Papers with Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference (Rotterdam, August 20-22, 2025). Rotterdam: International Scientific Unity, 2025. Issue 33. P. 16–20. DOI: 10.70286/isu-20.08.2025.001.

69. Про затвердження планів управління річковими басейнами Дніпра та Дону на 2025-2030 роки : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 01 листопада 2024 р. № 1077-р. База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1077-2024-%D1%80#Text> (дата звернення: 18.04.2026).

70. Про затвердження планів управління річковими басейнами Вісли, Дністра та Південного Бугу на 2025-2030 роки : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 01 листопада 2024 р. № 1078-р. База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1078-2024-%D1%80#Text> (дата звернення: 18.04.2026).

71. Про затвердження планів управління річковими басейнами річок

Причорномор'я, Приазов'я та Криму на 2025-2030 роки : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 01 листопада 2024 р. № 1079-р. База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1079-2024-%D1%80#Text> (дата звернення: 18.04.2026).

72. Про затвердження плану управління річковим басейном Дунаю на 2025-2030 роки : Розпорядження Кабінету Міністрів України від 31 грудня 2024 р. № 1347-р. База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1347-2024-%D1%80#Text> (дата звернення: 18.04.2026).

73. Про затвердження Порядку розроблення схем оптимізації систем централізованого водопостачання та Порядку розроблення схем оптимізації систем централізованого водовідведення : Наказ Міністерства розвитку громад та територій України від 12 червня 2025 р. № 986. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 11 серпня 2025 р. за № 1183/44589. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1183-25#n8> (дата звернення: 18.04.2026).

74. Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року : Указ Президента України від 30.09.2019 р. № 722/2019. База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/722/2019#Text> (дата звернення: 16.12.2024).

75. Річна національна програма під егідою Комісії Україна - НАТО на 2020 рік : Указ Президента України від 26 травня 2020 р. № 203. База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/203/2020#n9> (дата звернення: 18.04.2026).

76. Системи очистки води в екстремальних умовах. Формула води: веб-сайт. URL: <https://formulavody.com.ua/uk/sistemy-ochistki-vody-v-ekstremalnih-uslovijah/> (дата звернення: 13.02.2023).

77. Соколова Ю. Наслідки підриву Каховської ГЕС: які населені пункти затопило (карта). Факти: веб-сайт. URL: <https://fakty.com.ua/ua/proisshestvija/20230612-pid-zagrozyu-zatoplennya-desyatky-naselenyh-punktiv-karta-naslidkiv-pidryvu-kahovskoyi-ges/> (дата звернення: 10.07.2023).

78. Соколюк В. М. Сезонні коливання показників якості питного води у різних біогеохімічних зонах України. Науковий вісник ветеринарної медицини. 2011. Вип. 8(87). С. 158–161. URL: <http://ir.polissiauniver.edu.ua/handle/123456789/14394>.

79. Сталій розвиток водного господарства: принципи та управління / Ю. Ю. Дмитрук // Екологія і ресурси. 2016. Вип. 12. URL: <http://er.nau.edu.ua/index.php/er/article/view/11833> (дата звернення: 15.05.2025).

80. Статистична інформація. Державна служба статистики України: веб-сайт. URL: <https://ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 15.07.2023).

81. Стендер П. Контейнерні вирішення складних проблем. Планета H₂O: веб-сайт. URL: <https://planetah2o.com.ua/this-is-interesting/kontejnernie-reshenija-slozhnih-problem/> (дата звернення: 13.02.2023).

82. Стратегія національної безпеки України : Указ Президента України від 14 вересня 2020 р. № 392. База даних «Законодавство України» / ВР України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/392/2020#n12> (дата звернення: 18.04.2026).

83. Управлінські технології в житлово-комунальному секторі: досвід Східної Європи / за ред. І. М. Ковалю. Львів: Політехніка, 2022. 212 с.

84. Управління ризиками відповідно до стандарту ISO 31000:2018. Журнал Охорона праці: веб-сайт. URL: <https://ohoronapraci.com.ua/articles/560354-upravlinnya-ryzykamy-vidpovidno-do-standartu-iso-310002018> (дата звернення: 13.08.2025).

85. Управління ризиками відповідно до стандарту ISO 31000:2018. Quality Expert: веб-сайт. URL: <https://qualityexpert.com.ua/articles/657421-upravlinnya-ryzykamy-vidpovidno-do-standartu-iso-310002018> (дата звернення: 13.08.2025).

86. Уряднікова І. В. Розробка узагальненого алгоритму оптимального управління якістю водоочищення в системах оборотного водопостачання. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2022. Вип. 40. С. 59–64. DOI: 10.32347/2524-0021.2022.40.59-64.

87. Уряднікова І. В. Використання логіко-графічних методів аналізу ризиків в системах водопостачання теплоенергетичних виробництв. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2024. Вип. 47. С. 47–55. DOI: 10.32347/2524-0021.2024.47.47-55.

88. Уряднікова І. В. Дослідження взаємозв'язку надійності, ризиків і безпеки систем водоочищення. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2025. Вип. 49. С. 85–93. DOI: 10.32347/2524-0021.2025.49.85-93.

89. Уряднікова І. В. Аналіз взаємозв'язку між динамікою похибок і загальним рівнем ризику у функціонуванні систем водоочищення. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2025. Вип. 50. С. 75–82. DOI: 10.32347/2524-0021.2025.50.75-82.

90. Уряднікова І. В. Використання критеріїв оцінки стійкості і вразливості функціонування систем водоочищення для ефективного управління ризиками. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2025. Вип. 51. С. 53–59. DOI: 10.32347/2524-0021.2025.51.53-59.

91. Уряднікова І. В. Інтегративний підхід до оцінки безпеки систем водоочищення. Вісті Донецького гірничого інституту. 2025. Вип. 1 (56). С. 103–111. DOI: 10.31474/1999-981X-2025-1-103-111.

92. Уряднікова І. В. Інтегральна оцінка техногенного ризику систем водопостачання теплоенергетичних підприємств в умовах воєнних загроз. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2026. Вип. 53. С. 56–61. DOI: 10.32347/2524-0021.2026.53.56-61.

93. Уряднікова І. В., Хоружий В. П. Визначення умов надійності роботи систем оборотного водопостачання в теплоенергетиці. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2023. Вип. 42. С. 84–90. DOI: 10.32347/2524-0021.2023.42.84-90.

94. Уряднікова І. В., Хоружий В. П. Оцінка надійності роботи блоків систем водоочищення в перехідних режимах. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2023. Вип. 43. С. 81–86. DOI: 10.32347/2524-0021.2023.43.81-86.

95. Уряднікова І., Хоружий В., Аргатенко Т. Визначення техногенних ризиків при використанні різних технологій водоочищення. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2024. Вип. 46. С. 65–73. DOI: 10.32347/2524-0021.2024.46.65-73.

96. Хомутецька Т., Кондрицька І., Курбанова Т., Нор В. Забезпечення споживачів

сітьгоспводопроводів якісною питною водою. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2023. Вип. 45. С. 78–87. DOI: 10.32347/2524-0021.2023.45.78-87.

97. Хомутецька Т., Аргатенко Т. Дослідження зміни показників якості підземних вод за час експлуатації водозабірної свердловини. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2022. Вип. 39. С. 71–80. DOI: 10.32347/2524-0021.2022.39.71-80.

98. Хомутецька Т., Хоружий В., Нор В. Оптимізація роботи установок при знезалізненні підземних і доочищенні стічних вод. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2022. Вип. 38. С. 55–65. DOI: 10.32347/2524-0021.2022.38.55-65.

99. Хомутецька Т., Хоружий В., Недашківська Я., Недашковський І., Нор В. Імітаційне моделювання систем водопостачання з метою енергозбереження. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2020. Вип. 34. С. 25–36. DOI: 10.32347/2524-0021.2020.34.25-36.

100. Хоружий В., Хомутецька Т., Недашковський І. Модернізація споруд в системах водопостачання з поверхневих джерел. Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки. 2021. Вип. 37. С. 74–83. DOI: 10.32347/2524-0021.2021.37.74-83.

101. Що таке методології оцінки ризиків? Континуум GRC: веб-сайт. URL: <https://continuumgrc.com/uk/what-are-risk-assessment-methodologies/> (дата звернення: 18.04.2026).

102. Чугай А., Хлод А., Пилипюк В. Стан та якість води в басейні р. Десна (в межах Чернігівської області). Екологічні проблеми. 2021. Вип. 6, № 4. С. 226–232. DOI: 10.23939/ep2021.04.226.

103. ЮНІСЕФ доставив обладнання для доставки та очищення води для підтримки понад 3 млн людей в Україні. UNICEF: веб-сайт. URL: <https://www.unicef.org/ukraine/press-releases/unicef-donates-water-and-hygiene-supplies-support-3-million-people-ukraine> (дата звернення: 20.01.2023).

104. Яковлев В. В. Питне водозабезпечення міст на підставі окремого

використання підземних вод (на прикладі м. Харкова) : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.04. Харків, 1999. 195 с.

105. Яковлєв В. В. Перспективні джерела природних вод для питного водопостачання України, їх охорона і раціональне використання : дис. ... доктора геол. наук : 21.06.01. Харків, 2017. 357 с.

106. A Study of the Influence of Reinforcement Degradation on the Durability of Reinforced Concrete Structures of Marine Berths. *Strength of Materials*. 2022. Vol. 54. P. 622–629. DOI: 10.1007/s11223-022-00440-0.

107. African Ministers' Council on Water (AMCOW). The Africa Water Vision for 2025: Equitable and Sustainable Use of Water for Socioeconomic Development. Addis Ababa: UN Water/Africa, 2000. URL: <https://www.amcow-online.org> (дата звернення: 16.12.2024).

108. Agathokleous A., & Christodoulou S. Modeling and analysis of urban water distribution networks during intermittent water supply periods. 18th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), Lemesos, Cyprus, 2016. P. 1–6. DOI: 10.1109/melcon.2016.7495470.

109. Ahmed D., Bajwa I. N., Jaszczur A. Y. Big Data Analytics for Water Resource Management. Elsevier, 2021. DOI: 10.1016/C2019-0-01639-6.

110. Australian National Water Strategy. Experience of projects on treated wastewater reuse implementation, 2021. URL: <https://www.dcceew.gov.au/water/policy/policy/national-water-agreement> (дата звернення: 16.12.2024).

111. Babanina I. Overview of the situation with the destruction of water supply and drainage infrastructure in Donetsk region. Ecology. Right. People: web-site. URL: <http://epl.org.ua/announces/oglyad-sytuatsiyi-z-rujnuvannyam-infrastruktury-vodopostachannya-ta-vodovidvedennya-u-donetskij-oblasti/> (дата звернення: 10.07.2023).

112. Babu Ghimire A., Parajuli U., Bhusal A., Parajuli A., Banjara M., & Shin S. Investigating a Diversified and Decentralized Water Distribution System to Enhance Water Supply Resilience to Disruptive Events. *World Environmental and Water Resources*

Congress 2023. DOI: 10.1061/9780784484852.087.

113. Barbosa P. S. F., & Graciano A. P. Optimal Design of Hydraulic Networks for Water Supply. Developments in Civil & Construction Engineering Computing, Civil-Comp Press, Edinburgh, UK, 1993. P. 197–202. DOI: 10.4203/ccp.15.8.2.

114. Bartram J., Corrales L., Davison A. et al. Water Safety Plan Manual: Step-by-Step Risk Management for Drinking-Water Suppliers. Geneva: WHO, 2009. URL: https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/wsp-manual-step-by-step/en/ (дата звернення: 16.12.2024).

115. Bench-Scale Performance Evaluation of Phosphonate (HEDP) for Corrosion Inhibition of Carbon Steel in a Power Plant Cooling Water System / Olha Biedunkova, Pavlo Kuznietsov, Serhii Martynov, Alla Kucherova, Oleksandr Hrytsyna // Engineering Reports. 2025. Vol. 7. e70473. DOI: 10.1002/eng2.70473.

116. Bernard B. K., Hubbs S. A. Chlorine vs Chlorine bleach: what's the difference? 2020. The Water Quality & Health Council. URL: <https://waterandhealth.org/disinfect/chlorine-vs-chlorine-bleach-whats-the-difference/>.

117. Bull R. J. Drinking Water Disinfection By-Products. Environmental Toxicants. 2008. P. 121–196. Portico. DOI: 10.1002/9780470442890.ch6.

118. Chemical contamination of drinking water and its long-term impact on public health / R. M. Harrison // Science of the Total Environment. 2022. Vol. 806. 150941. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150941.

119. Chen B., Westerhoff P., Krasner S. W. Fate and Transport of Wastewater-Derived Disinfection By-Products in Surface Waters. Disinfection By-Products in Drinking Water. 2008. P. 257–273. DOI: 10.1021/bk-2008-0995.ch018.

120. Chemil M., Zizi Z., Drouiche N., Khodja M., Hadji M. Water treatment technology performance for chemical enhanced oil recovery: modeling, simulation and optimization. Applied Water Science. 2021. Vol. 11(9). DOI: 10.1007/s13201-021-01476-4.

121. Chernyshev D., Makarenko Y., Khomutetska T., & Makarenko V. Investigation of the relationship between the strength limit and the long time fatigue of steel reinforcements of reinforced concrete structures. Transfer of Innovative Technologies.

2021. Vol. 4(2). P. 28–40. DOI: 10.32347/tit2021.42.0201.

122. Choi Y., Byun S.-H., Jang H.-J., Kim S.-E., & Choi Y. Comparison of disinfectants for drinking water: chlorine gas vs. on-site generated chlorine. *Environmental Engineering Research*. 2021. Vol. 27(1). Article 200543-0. DOI: 10.4491/eer.2020.543.

123. Cole J., Sharvelle S., Fourness D., Grigg N., Roesner L., & Haukaas J. Centralized and Decentralized Strategies for Dual Water Supply: Case Study. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2018. Vol. 144(1). DOI: 10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000856.

124. Decentralized Water Reuse Systems: Planning, Design, and Implementation / M. B. Hamoda. IWA Publishing, 2018. 240 p. DOI: 10.2166/9781780408544.

125. Diao K. Towards resilient water supply in centralized control and decentralized execution mode. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*. 2021. Vol. 70(4). P. 449–466. DOI: 10.2166/aqua.2021.162.

126. Energy efficiency optimization in municipal water pumping systems / L. G. Ribeiro, M. C. Almeida // *Water Resources Management*. 2020. Vol. 34(8). P. 2451–2467. DOI: 10.1007/s11269-020-02561-2.

127. Environmental protection and strategic waste management reform models / K. Thomson // *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 302. 126941. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126941.

128. EPA Reports on Drinking Water Infrastructure. Recommendations on water losses and smart metering. Washington, DC: Environmental Protection Agency, 2023. URL: <https://www.epa.gov/safewater> (дата звернення: 16.12.2024).

129. European Commission. Directive (EU) 2020/2184 on the quality of water intended for human consumption // *Official Journal of the European Union*, 2020. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj/eng> (дата звернення: 16.12.2024).

130. European Commission. Directive (EU) 2023/1791 on energy efficiency and amending Regulation (EU) 2023/955 // *Official Journal of the European Union*, 2023. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32023L1791> (дата звернення: 20.02.2026).

131. European Union Regional Development Program. Infrastructure projects

overview for water and wastewater systems in EU. Brussels: EC, 2022. URL: https://ec.europa.eu/regional_policy/ (дата звернення: 16.12.2024).

132. Eurowater. Water treatment plant in container - ready for use. URL: <https://www.eurowater.com/en/water-treatment-plants/water-treatment-in-container> (дата звернення: 13.02.2023).

133. Francis R. A. The impacts of modern warfare on freshwater ecosystems // Environmental Management, 2011. Вип. 48(5). С. 985–999. DOI: 10.1007/s00267-011-9746-9.

134. Geleta Ebsa D., & Fufa F. Hydraulic performance Analysis of water supply distribution network using water GEM v8i. Drinking Water Engineering and Science Discussions [preprint]. 2021. DOI: 10.5194/dwes-2020-34.

135. Global Wastewater Status Report. Global analysis of wastewater management and infrastructure optimization models. Hamilton: UNU-INWEH, 2022. URL: <https://unu.edu/inweh/tools-and-resources/global-wastewater-status> (дата звернення: 16.12.2024).

136. Global Water Security and Sanitation Partnership: Annual Report. Washington, DC: World Bank, 2023. URL: <https://www.worldbank.org/en/topic/water/publication/global-water-security-and-sanitation-partnership-annual-report-2023> (дата звернення: 16.12.2024).

137. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda. Geneva: World Health Organization, 2022. 614 p.

138. Heavy metals in drinking water and risk assessment for human health / J. Nriagu // Environmental Geochemistry and Health. 2018. Vol. 40(5). P. 1715–1730. DOI: 10.1007/s10653-017-0014-9.

139. Heijman S. G. J., van Paassen A. M., van der Meer W. G. J., Hopman R. Adsorptive removal of natural organic matter during drinking water treatment. Water Science and Technology. 1999. Vol. 40(9). P. 183–190. DOI: 10.1016/s0273-1223(99)00655-1.

140. Hofste R. W., Kuzma S., Walker S., Sutanudjaja E. H. et al. Aqueduct 3.0: Updated Decision-Relevant Global Water Risk Indicators Systemology. World Resources

Institute, 2019. DOI: 10.46830/writn.18.00146.

141. Hozalski R. M., Bouwer E. J., Goel S. Removal of natural organic matter (NOM) from drinking water supplies by ozone-biofiltration. *Water Science and Technology*. 1999. Vol. 40(9). P. 157–163. DOI: 10.1016/s0273-1223(99)00652-6.

142. Hybrid renewable energy microgrids for remote and resilient water infrastructure / S. Kumar, R. Naidoo // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 156. 111983. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111983.

143. Hutton G., & Varughese M. The Costs of Meeting the 2030 Sustainable Development Goal Targets on Drinking Water, Sanitation, and Hygiene Systems Research. *World Bank Reports*, 2016. DOI: 10.15566/k8543.

144. Integrating solar photovoltaic systems into municipal water treatment facilities: Energy savings and environmental benefits / J. Zhang, K. Smith, Y. Wang // *Applied Energy*. 2021. Vol. 298. 117215. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.117215.

145. Intermittent water supply and its impact on the energy-water nexus / M. Gallagher, H. Rogers // *Journal of Environmental Management*. 2019. Vol. 242. P. 112–124. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.04.053.

146. ISO 31000. Wikipedia: web-site. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/ISO_31000 (дата звернення: 13.08.2025).

147. Jain A., Kushwaha V. K., Vijayakumar A. The Role of Artificial Intelligence in Water Resource Management: A Review. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 289. 125791. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.125791.

148. Khoruzhy V. P. Investigation of mechanical properties and crack resistance parameters of steel reinforcements of reinforced concrete structures of long-term special term / P. Kulikov, Y. Makarenko, V. Khoruzhy, V. Makarenko // *Підводні технології. Промислова та цивільна інженерія*. 2021. № 11. С. 78–87. DOI: 10.32347/uwt2021.11.1801.

149. Kibaroglu A. State-of-the-art review of transboundary water governance in the Euphrates-Tigris river basin // *International Journal of Water Resources Development*, 2019. Вип. 35(1). С. 4–29. DOI: 10.1080/07900627.2017.1408458.

150. Kobylanskyi V. Y., Kravchenko O. V., Uriadnikova I. V., Sorokina K. B.

Identification of approaches to developing a response plan for potential emergencies caused by external water contamination. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2024. Vol. 1415 (1). DOI: 10.1088/1755-1315/1415/1/012103.

151. Lecture Notes in Civil Engineering. Study of Mechanical Properties of Shipbuilding Pipe Steels for Cooling Systems of Long-Term Operation in a Wide Range of Sub-zero Temperatures. 2024. Vol. 469 LNCE. P. 83–90. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-55068-3_8.

152. Martynov S. Yu., Poliakov V. L. Experimental studies of iron transformations kinetics and autocatalysis during its physicochemical removal from underground water. Water Supply. 2022. Vol. 22, no. 3. P. 2883–2895. DOI: 10.2166/ws.2021.428.

153. Martynov S. Yu., Poliakov V. L. Experimental studies on the hydrodynamic properties of a deposit in rapid filters during physicochemical removal of iron from groundwater. Water Supply. 2022. Vol. 22, no. 10. P. 7603–7617. DOI: 10.2166/ws.2022.305.

154. Maryati S., Firman T., & Humaira A. N. S. A sustainability assessment of decentralized water supply systems in Bandung City, Indonesia. Utilities Policy. 2022. Vol. 76. Article 101373. DOI: 10.1016/j.jup.2022.101373.

155. Matilainen A., Sillanpää M. Removal of natural organic matter from drinking water by advanced oxidation processes. Chemosphere. 2010. Vol. 80(4). P. 351–365. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2010.04.067.

156. Matos A., Antunes J. P., Santos L. Sustainability assessment of urban water systems: A review. Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 218. P. 586–599. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.254.

157. Metsämuuronen S., Sillanpää M., Bhatnagar A., Mänttari M. Natural Organic Matter Removal from Drinking Water by Membrane Technology. Separation & Purification Reviews. 2013. Vol. 43(1). P. 1–61. DOI: 10.1080/15422119.2012.712080.

158. Municipal infrastructure development and separate collection systems in local communities / G. R. Davies // Resources, Conservation and Recycling. 2022. Vol. 178. 106014. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.106014.

159. National Protective Security Authority. Chemical, Biological, Radiological and

Nuclear (CBRN) Threats. London: NPSA, 2023. URL: <https://www.npsa.gov.uk/chemical-biological-radiological-and-nuclear-cbrn-threats> (дата звернення: 14.10.2023).

160. Nitrates in drinking water and risk of various types of cancer: A review / P. Vineis // Environmental Health Perspectives. 2019. Vol. 127(4). 045001. DOI: 10.1289/EHP3102.

161. OECD. Water Policy in Ukraine: Current Challenges and Future Directions. Paris: OECD Publishing, 2016. URL: <https://www.oecd.org/environment/water-policy-in-ukraine-9789264252654-en.htm> (дата звернення: 15.05.2025).

162. Olayiwola N., Winters D., Ahmad R., Glover E. Hydraulic Modeling for Emergency Water Supply and Disaster Planning. Pipelines 2012. DOI: 10.1061/9780784412480.092.

163. Onanko Y., Yatsiuk M., Matseliuk E., Onanko A. Analysis of the Key Mechanisms for Cleaning Infiltration Water From Reservoir Biocolloids / ed. L. Kuzmych // Balancing Water-Energy-Food Security in the Era of Environmental Change. IGI Global Scientific Publishing, 2025. P. 227–246. DOI: 10.4018/979-8-3693-5693-7.ch011.

164. Parveen N., Chowdhury S., Goel S. Environmental impacts of the widespread use of chlorine-based disinfectants during the COVID-19 pandemic. Environmental Science and Pollution Research. 2022. Vol. 29(57). P. 85742–85760. DOI: 10.1007/s11356-021-18316-2.

165. Poliakov V. L., Martynov S. Yu. Technological modeling of physicochemical removal of iron from deep groundwater. Heliyon. 2023. Vol. 9 (9). e20202. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e20202.

166. Poliakov V. L., Martynov S. Y. The issues of technological modeling of physicochemical iron removal from deep groundwater at the rapid filter. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2024. Vol. 1415. 012093. DOI: 10.1088/1755-1315/1415/1/012093.

167. Progress on Wastewater Treatment - 2021 Update // UN-Water Statistical Reports. Geneva: UN-Water, 2021. URL: <https://www.unwater.org/publications/progress-wastewater-treatment-2021-update> (дата звернення: 16.12.2024).

168. Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2020: Five years into the SDGs // WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme (JMP). Geneva, New

York, 2021. URL: <https://washdata.org> (дата звернення: 16.12.2024).

169. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Safe Drinking Water Act (SDWA) and National Primary Drinking Water Regulations. URL: <https://www.epa.gov/dwreginfo/drinking-water-regulations> (дата звернення: 18.04.2026).

170. United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). Checklist for contingency. Geneva: UNECE, 2016. URL: https://unece.org/DAM/env/documents/2016/TEIA/ece.cp.teia.34.r_Checklist_for_contingency.pdf (дата звернення: 01.11.2023).

171. United Nations. Répondre au défi: fournir l'accès à l'eau potable et salubre dans le monde. UN Chronicle. URL: <https://www.un.org/fr/chronicle/article/repondre-au-defi-fournir-lacces-leau-potable-et-salubre-dans-ле-монде> (дата звернення: 01.11.2023).

172. United Nations. The millennium development goals report. New York: UN, 2015. DOI: 10.18356/3b971b46-en.

173. UNICEF. Community-Led Total Sanitation: Field Notes. New York: UNICEF, 2013. URL: <https://www.unicef.org> (дата звернення: 16.12.2024).

174. UNICEF. Water under fire: For every child, water and sanitation in complex emergencies. New York, NY: United Nations Children's Fund, 2019. URL: <https://www.unicef.org/media/51286/file> (дата звернення: 16.12.2024).

175. UN-Water Global Analysis and Assessment of Sanitation and Drinking-Water (GLAAS). Report // Global investment infrastructure needs for SDG6. Geneva: WHO, 2022. URL: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240062955> (дата звернення: 16.12.2024).

176. UN World Water Development Report. Water safety plans (WSP) adaptation and modernization. Paris: UNESCO, 2024. URL: <https://www.unesco.org/en/wwap/wwdr> (дата звернення: 16.12.2024).

177. Uriadnikova I. V., Lebedev V. H., Zaplatynskiy 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. P. 95–101. DOI: 10.33271/nvngu/2022-1/095.

178. Water-related infectious diseases and health risks from non-compliant distribution

systems / S. L. West // Journal of Water and Health. 2021. Vol. 19(2). P. 215–230. DOI: 10.2166/wh.2021.188.

179. Water quality standards and regulatory compliance mechanisms in European countries / M. Schulz // Environmental Science & Policy. 2023. Vol. 142. P. 89–102. DOI: 10.1016/j.envsci.2023.01.011.

180. Weinthal E., Sowers J. Targeting infrastructure and livelihoods in the West Bank and Gaza // International Affairs, 2019. Вип. 95(2). С. 319–340. DOI: 10.1093/ia/iiz015.

181. World Bank. World development report 2011: Conflict, security, and development. Washington, DC: World Bank, 2011. URL: <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/966731468161352341/world-development-report-2011-conflict-security-and-development> (дата звернення: 16.12.2024).

182. World Health Organization. Guidelines for Drinking-water Quality: Fourth Edition Incorporating the First Addendum. Geneva: WHO, 2017. 614 p. Електронна версія: NCBI Bookshelf. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK579461/> (дата звернення: 18.04.2026).

183. Wilken J. A., DiMaggio M., Kaufmann M., O'Connor K., Smorodinsky S., Armatas C., Barreau T., Kreutzer R., Ancheta L. Inhalational Chlorine Injuries at Public Aquatic Venues – California, 2008-2015. MMWR. Morbidity and Mortality Weekly Report. 2017. Vol. 66(19). P. 498–501. DOI: 10.15585/mmwr.mm6619a3.

184. Yatsiuk M., Sydorenko O., Tsvetova O., Turaieva O. Features of the Hydrological Regime of Shatsk Water Bodies of the Volyn Region. Handbook of Research on Improving the Natural and Ecological Conditions of the Polesie Zone: monograph. IGI Global. Hershey, PA, USA, 2023. P. 402–416. DOI: 10.4018/978-1-6684-8248-3.

185. Yatsiuk M., Sydorenko O., Tsvetova O., Turaieva O., Saidak R. Impact of Climate Change on Water Resources in the Ukrainian Polissia. Balancing Water-Energy-Food Security in the Era of Environmental Change. IGI Global Scientific Publishing, 2025. P. 389–412. DOI: 10.4018/979-8-3693-5693-7.ch017.

186. Yatsiuk M. Foreword. Sustainable Soil and Water Management Practices for Agricultural Security. IGI Global Scientific Publishing, 2025. P. 11–22. DOI: 10.4018/979-

8-3693-8307-0.

187. Yatsiuk M. Foreword. Balancing Water-Energy-Food Security in the Era of Environmental Change. IGI Global Scientific Publishing, 2025. P. 17–18. DOI: 10.4018/979-8-3693-5693-7.ch017.

188. Yoo D. G., Lee J. H., Lee B. Y. Comparative Study of Hydraulic Simulation Techniques for Water Supply Networks under Earthquake Hazard. Water. 2019. Vol. 11. P. 333. DOI: 10.3390/w11020333.

189. Yang B., Yu G., & Wang D. Hydraulic Calculation Software Development of Water Supply Networks Based on AutoCAD. ICPTT 2011. DOI: 10.1061/41202(423)166.

190. European Commission. Directive (EU) 2020/2184 on the quality of water intended for human consumption // Official Journal of the European Union, 2020. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2020/2184/oj/eng> (дата звернення: 16.12.2024).

191. European Commission. Directive (EU) 2023/1791 on energy efficiency and amending Regulation (EU) 2023/955 // Official Journal of the European Union, 2023. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32023L1791> (дата звернення: 20.02.2026).

192. European Union Regional Development Program. Infrastructure projects overview for water and wastewater systems in EU. Brussels: EC, 2022. URL: https://ec.europa.eu/regional_policy/ (дата звернення: 16.12.2024).

193. EPA Reports on Drinking Water Infrastructure. Recommendations on water losses and smart metering. Washington, DC: Environmental Protection Agency, 2023. URL: <https://www.epa.gov/safewater> (дата звернення: 16.12.2024).

194. Global Wastewater Status Report. Global analysis of wastewater management and infrastructure optimization models. Hamilton: UNU-INWEH, 2022. URL: <https://unu.edu/inweh/tools-and-resources/global-wastewater-status> (дата звернення: 16.12.2024).

195. Global Water Security and Sanitation Partnership: Annual Report. Washington, DC: World Bank, 2023. URL: <https://www.worldbank.org/en/topic/water/publication/global-water-security-and-sanitation-partnership-annual-report-2023> (дата звернення: 16.12.2024).

196. Progress on Wastewater Treatment - 2021 Update // UN-Water Statistical Reports. Geneva: UN-Water, 2021. URL: <https://www.unwater.org/publications/progress-wastewater-treatment-2021-update> (дата звернення: 16.12.2024).

197. Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2020: Five years into the SDGs // WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme (JMP). Geneva, New York, 2021. URL: <https://washdata.org> (дата звернення: 16.12.2024).

Додаток А

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. О. Кравченко, Т. Аргатенко, С. Потапенко, Т. Куба Забезпечення енергетичної сталості та енергоефективності систем питного водопостачання та водовідведення: роль децентралізованих технологій у кризових ситуаціях, Науково-технічний журнал «Енергетичні технології та ресурсозбереження». 2025. 85 (4). С. 54–69. DOI: 10.33070/etars.4.2025.04. **(SCOPUS, Q4)**

Особистий внесок здобувача полягає у здійсненні аналізу ключових вразливостей систем питного водопостачання та водовідведення великих міст, проведенні детального аналізу та класифікації ризиків для об'єктів критичної інфраструктури, оцінці нових нормативних підходів до розроблення схем оптимізації як інструменту довгострокового планування стійкості та енергоефективності, а також у формуванні концептуальних засад інтегрованої моделі підвищення стійкості інфраструктури.

2. Кравченко О., Кобилянський В., Аргатенко Т., Нечипор О., Потапенко С. (2025). Аналіз ризиків здоров'ю населення через недотримання вимог ДСанПіН 2.2.4-171-10 «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною». Фітотерапія. Часопис, 4, 119–132, DOI: 10.32782/2522-9680-2025-4-19. **(SCOPUS, Q4)**

Особистий внесок здобувача полягає у здійсненні аналізу вимог до якості питної води та проведенні порівняльного оцінювання вітчизняних і міжнародних стандартів, що формує санітарно-епідеміологічне обґрунтування для розробки стратегій підвищення стійкості та надійності систем питного водопостачання.

3. О. Кравченко, С. Потапенко, Т. Аргатенко, Г. Роговська. Ризики застосування газоподібного хлору на водоочисних станціях під час воєнних дій, Науково-технічний збірник КНУБА № 43 (2023) Проблеми водопостачання, водовідведення та

гідравліки, С. 29–35. DOI: 10.32347/2524-0021.2023.43.29-35. **(Фахове видання)**

Особистий внесок здобувача полягає у здійсненні оцінки ризиків застосування газоподібного хлору під час бойових дій та обґрунтуванні доцільності переходу на безпечніші альтернативні методи знезараження питної води, що є невід’ємною складовою забезпечення стабільного питного водопостачання та підвищення загальної стійкості інфраструктури у кризових умовах.

4. О. Кравченко, Т. Куба, С. Потапенко, В. Хоружий, Т. Аргатенко, О. Бакуновський. Планування та організація децентралізованих систем водопостачання у воєнний період в Україні, Науково-технічний збірник КНУБА № 44 (2023) Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, С. 29–39. DOI: 10.32347/2524-0021.2023.44.29-39. **(Фахове видання)**

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі та розробленні концептуальних засад планування й організації децентралізованих систем питного водопостачання в умовах воєнного стану як елемента підвищення загальної стійкості інфраструктури.

5. О. Кравченко, С. Потапенко, Т. Куба, Т. Аргатенко. Вимоги до гідравлічного моделювання мереж водопостачання у воєнний час та для управління ризиками ХБРЯ-забруднень, Науково-технічний збірник КНУБА № 45 (2023) Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, С. 32–38. DOI: 10.32347/2524-0021.2023.45.32-38. **(Фахове видання)**

Особистий внесок здобувача полягає в обґрунтуванні методів управління ризиками хімічного, біологічного, радіаційного і ядерного (ХБРЯ) забруднення як необхідної складової для забезпечення надійності та підвищення стійкості систем питного водопостачання.

6. С. Потапенко, О. Кравченко. Основні проблеми функціонування існуючих систем водопостачання та водовідведення в Україні, Науково-технічний збірник КНУБА № 46 (2024) Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, С. 35–42. DOI: 10.32347/2524-0021.2024.46.35-42. **(Фахове видання)**

Особистий внесок здобувача полягає в одноосібному здійсненні аналізу нагальних проблем сфери питного водопостачання та водовідведення в умовах війни,

а також у самостійному розробленні концептуальних засад нової методики оптимізації систем питного водопостачання та водовідведення.

7. О. Кравченко, Т. Куба, С. Потапенко, О. Нечипор, Н. Таварткіладзе, О. Бакуновський. Розробка пілотної установки для удосконалення технології очищення води на Деснянській водопровідній станції м. Києва, Науково-технічний збірник КНУБА № 47 (2024) Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, С. 23–28. DOI: 10.32347/2524-0021.2024.47.23-28. **(Фахове видання)**

Особистий внесок здобувача полягає в участі в аналізі ефективності існуючих методів водопідготовки та загальному обґрунтуванні напрямків їх модернізації, що є важливим елементом комплексної стратегії підвищення стійкості функціонування систем питного водопостачання.

8. С. Потапенко, О. Кравченко. Аналіз світового досвіду та науково-методичні підходи до оптимізації систем питного водопостачання та водовідведення, Науково-технічний збірник КНУБА № 49 (2025) Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки, С. 25–37. DOI: 10.32347/2524-0021.2025.49.25-37. **(Фахове видання)**

Особистий внесок здобувача полягає в одноосібному виконанні системного аналізу світового досвіду щодо законодавчого та практичного регулювання питань оптимізації систем питного водопостачання та водовідведення, а також в обґрунтуванні розроблення нових науково-методичних підходів у вигляді проєктів нових Порядків із формування схем оптимізації для забезпечення комплексної стійкості, безпеки та енергоефективності централізованих систем водопостачання та водовідведення.

9. С. Потапенко. Формування показників поточного стану та розвитку систем питного водопостачання та водовідведення, Науковий збірник КНУБА № 13 (2025) Просторовий розвиток, С. 374–390. DOI: 10.32347/2786-7269.2025.13.374-390. **(Фахове видання)**

Особистий внесок здобувача полягає в одноосібній розробці та науковому обґрунтуванні комплексної системи показників поточного стану та розвитку систем питного водопостачання та водовідведення, а також у самостійному створенні логіко-математичної моделі процесу їх формування для оцінювання

стійкості функціонування інфраструктури в межах оптимізації систем населених пунктів.

10. С. Потапенко. Моделі вирішення проблеми підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення, Науково-технічний збірник КНУБА № 74 (2025) Сучасні проблеми архітектури та містобудування, С. 482–498. DOI: 10.32347/2077-3455.2025.74.482-498. **(Фахове видання)**

Особистий внесок здобувача полягає в одноосібній розробці концептуальної багатокритеріальної моделі підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення, а також у самостійному логіко-математичному формалізуванні інтегрального показника стійкості для оптимізації управлінських рішень та зниження вразливості об'єктів критичної інфраструктури в умовах воєнних і техногенних загроз.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. С Потапенко, О Кравченко. Забезпечення перспективного довгострокового планування у сфері водопостачання та водовідведення в Україні, Робоча програма та тези доповідей III-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Екологія. Ресурси. Енергія. Багатофункціональні еко- та енергоефективні, ресурсозберігаючі технології в архітектурі, будівництві та суміжних галузях», Київ: КНУБА 23–25 листопада 2022. – С. 41–43. - Режим доступу: <https://drive.google.com/file/d/18EwrzZQT9CY2rYUv9-fUiAK88eXdO5uZ/view>.

Особистий внесок здобувача полягає в одноосібному аналізі чинних підходів до довгострокового планування у водопровідно-каналізаційному господарстві та самостійному обґрунтуванні перспективних стратегічних напрямів забезпечення стійкості й надійності функціонування систем питного водопостачання та водовідведення в Україні.

2. С Потапенко, О Кравченко. Забезпечення оптимальної роботи систем питного водопостачання та водовідведення під час війни, «Енергоощадні машини і технології», Матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції, 22–24

травня 2024 р. – К.: КНУБА, 2024. – С. 52–55. – Режим доступу: <https://drive.google.com/file/d/1KQHEqH8PTxV0VgoRR-UCOneQAQ4TnchU/view?ts=66d33d98>.

Особистий внесок здобувача полягає в одноосібному дослідженні чинників впливу військових дій на об'єкти критичної інфраструктури та самостійному обґрунтуванні комплексу інженерно-технологічних заходів для забезпечення оптимальної роботи й підвищення загальної стійкості систем питного водопостачання та водовідведення у кризовий період.

3. С Потапенко, О Кравченко. Забезпечення безпеки питної води для всіх в Україні, Робоча програма та тези доповідей V-ї Міжнародної науково-практичної конференції «Енергія. Ресурси. Екологія. Багатофункціональні еко- та енергоефективні, ресурсозберігаючі технології в архітектурі, будівництві та суміжних галузях», Київ: КНУБА 27–29 листопада 2024. – С. 69–71. - Режим доступу: <https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/12/ere-2024-ua.pdf>.

Особистий внесок здобувача полягає в одноосібному аналізі сучасних викликів у сфері водопідготовки та самостійному обґрунтуванні стратегічних підходів до забезпечення гарантованої безпеки й доступності питної води для населення, що є базовим елементом підвищення загальної стійкості та надійності функціонування систем водопостачання в Україні.

4. С Потапенко. Управління стійкістю систем питного водопостачання та водовідведення в умовах сучасних викликів, Advanced Technologies in Scientific Research: Collection of Scientific Papers with Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference. International Scientific Unity. August 20–22, 2025. Rotterdam, Netherlands. 16–20 p. URL: <https://isu-conference.com/en/archive/advanced-technologies-in-scientific-research-20-08-25/> , ISBN: 979-8-89704-977-6 (серія), DOI: 10.70286/isu-20.08.2025.001.

Особистий внесок здобувача полягає в одноосібному дослідженні та науковому обґрунтуванні концептуальних засад управління стійкістю систем питного водопостачання та водовідведення в умовах сучасних воєнних, техногенних та екологічних викликів для забезпечення надійності функціонування об'єктів критичної

інфраструктури.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

Статті у журналах:

1. О. Кравченко, С. Потапенко. Планування відновлення і розвитку систем водопостачання та водовідведення України у післявоєнний час, виробничо-практичний журнал «Водопостачання та водовідведення» спеціальний випуск лютий 2023, С. 18–21. - Режим доступу: [_https://ukrvodokanal.in.ua/wp-content/uploads/2023/05/zvitnyj-zhurnal_lyutyj-2023.pdf](https://ukrvodokanal.in.ua/wp-content/uploads/2023/05/zvitnyj-zhurnal_lyutyj-2023.pdf).

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі викликів і руйнувань об'єктів критичної інфраструктури в умовах воєнного стану, а також у науковому обґрунтуванні стратегічних підходів до планування післявоєнного відновлення та розвитку систем водопостачання й водовідведення з метою забезпечення їхньої довгострокової стійкості.

Проведені семінари:

2. В рамках заходів Всеукраїнського об'єднання організацій роботодавців «Федерація роботодавців комунальної інфраструктури, енергетики та житлово-комунального господарства України» С. Потапенко 27 лютого 2025 року проведено семінар на тему: «Світовий досвід та нові науково-методичні підходи до оптимізації систем питного водопостачання та водовідведення (нові підходи в законодавстві)» для профільних підприємств, органів місцевого самоврядування, інших зацікавлених сторін, що оприлюднено за посиланням: <https://fru-gkh.com/sites/seminar/20>

Запис можна прослухати за посиланням: https://www.youtube.com/watch?v=fKxL73EiEBk&ab_channel=%D0%A4%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%B0%D0%B2%D1%86%D1%96%D0%B2%D0%96%D0%9A%D0%93%D0%A3%D0%BA%D1%80%D0%B0%D1%97%D0%BD%D0%B8

Додаток Б

Лист підтримки
доктора технічних наук, професора Хоружого Віктора Петровича

Лист підтримки
доктора технічних наук, професора
Хоружого Віктора Петровича
10 червня 2026 року.
Ректору Київського
національного університету
будівництва і архітектури
Олексію Сергійовичу Дмітр.

Лист підтримки
Цим листом я, доктор технічних наук, професор
Хоружий Віктор Петрович, висловлюю свою підтримку
дисертаційному дослідженню Потапенко Світлани
Тавлівки на тему "Підвищення стійкості систем
питного водопостачання та водовідведення", що
пороється на здобуття наукового ступеня доктор
філософії за спеціальністю 192 "Будівництво та
цивільна інженерія".

Знаючи Світлану Тавлівку як висококваліфікованого
фахівця, хочу окремо відзначити її високий рівень
експертності у сфері житлово-комунального
господарства. Зокрема, хочу підкреслити її безпосередню
участь як провідного експерта у розробці надзвичайно
важливого нормативно-правового інструментарію
державного рівня - Порядків розроблення схем
оптимізації систем централізованого водопостачання
та водовідведення (затверджених наказом Міністерства
розвитку громад та територій України від 12 червня
2025 року №386, зареєстрованих у Міністерстві
юстиції України 11 серпня 2025 року за №183/44589).

Слід зазначити, що саме розроблені за визначеної
участі Потапенко С.П. Порядки стали фундаментальною
нормативною та практичною основою її дисертаційного
дослідження. Завдяки її роботі над цими документами,
вперше в Україні на законодавчому рівні було
формалізовано перехід від концепції статичної надійності
до динамічної стійкості критичної інфраструктури,
що є життєво необхідним в умовах воєнного стану.

Інтеграція науково-методичних розробок
здодувачки (таких як алгоритми управління ризиками
обов'язкове використання ГІС - аналізу та
інструментів згравітного моделювання) у
державні нормативні акти дозволить використовувати
дисертаційну роботу на практиці у повоєнних

відновленню та модернізації комунальних підприємств України.

Цей лист надано виключно для цілей наукової роботи Тюталенко Світлани Тавлівни та підтвердження її особистого книгового внеску у розбудову галузевої нормативно-правової бази.

Вважаю, що дисертаційна робота виконана на найвищому науково-практичному рівні, а її авторка, Тюталенко Світлана Тавлівна, безумовно, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії.

Доктор технічних наук,
професор

 Горущий В.Б.



Лист підтримки КП «Дніпроводоканал» ДМР



ДНІПРОВСЬКА МІСЬКА РАДА КОМУНАЛЬНЕ ПІДПРИЄМСТВО «ДНІПРОВОДОКАНАЛ»

вул. Троїцька, 21 А, м. Дніпро, 49001, тел. (056) 719-93-76, тел. (056) 719-93-69 E-mail: vodokanal.dp@gmail.com
Код ЄДРПОУ 03341305

№ 2326 від 29 05 2026 р

Ректору Київського національного
університету будівництва і
архітектури
Олексію ДНІПРОВУ

*Щодо впровадження заходів з підвищення
стійкості систем питного водопостачання
та водовідведення міста Дніпро*

У межах реалізації проекту перехідної допомоги «Зміцнення стійкості міст у сферах інфраструктури постачання та житла» (SUR), що фінансується BMZ та реалізується GIZ, Дніпровська міська рада, КП «Дніпроводоканал» ДМР (далі – Підприємство) спільно з експертами Консорціуму «ІТ ОТГ» провело комплексне дослідження та розробку Стратегії стійкості систем питного водопостачання та водовідведення міста Дніпро.

Проведений аналіз підтвердив критичну необхідність впровадження системних заходів для забезпечення безперебійного надання послуг в умовах воєнного стану. Зокрема, було ідентифіковано 19 ключових операційно-технічних та 4 специфічних ХБРЯ-ризиків. Основними викликами для Підприємства визначено високу енергетичну вразливість високовольтних насосних агрегатів на водозаборах, значний знос мереж (близько 40% водопровідних мереж є ветхими) та подвійну загрозу, пов'язану з використанням зрідженого хлору.

Результатом проведеної роботи стали розроблені для Підприємства Заходи та Стратегія щодо підвищення стійкості систем, які включають наступні пріоритетні напрями.

1. Енергетична незалежність – технічні рішення для автономного живлення високовольтних насосів («насосів блекауту») та забезпечення 100% КНС надійними джерелами енергопостачання з АВР.

2. Хімічна безпека – стратегічний план повного переходу зі зрідженого хлору на безпечну технологію виробництва гіпохлориту натрію безпосередньо на об'єктах.

3. Операційна керованість – створення ГІС-бази даних та відкаліброваної гідравлічної моделі міста для моделювання кризових сценаріїв та оптимізації роботи мереж у реальному часі.

Науково-методологічний супровід та участь у розробці зазначених заходів здійснювалися за безпосередньої участі фахівців Консорціуму «ІТ ОТГ» та експертів, зокрема Кравченка Олександра Валерійовича, Батрак Лілії Іванівни, Бакуновського Олега Олеговича та Потапенко Світлани Павлівни. Підприємство забезпечило умови для проведення польових досліджень, збору технічних даних та апробації алгоритмів створення знеособлених гідравлічних моделей.

Цей лист надано виключно для цілей наукової роботи Потапенко Світлани Павлівни та підтвердження практичної значущості результатів досліджень для зміцнення критичної інфраструктури міста в умовах збройної агресії.

В.О. Директора
КП «Дніпроводоканал» ДМР

 Геннадій ДЕМЕНІН

Акт про використання та практичне впровадження результатів роботи КП «Дніпроводоканал» ДМР



АКТ

про використання та практичне впровадження
результатів розробки Заходів та Стратегії щодо підвищення стійкості
систем питного водопостачання та водовідведення міста Дніпро

Підставою для складання Акта є реалізація проєкту перехідної допомоги «Зміцнення стійкості міст у сферах інфраструктури постачання та житла» (SUR), що фінансується BMZ та реалізується GIZ. У межах зазначеного проєкту фахівці Комунального підприємства «Дніпроводоканал» Дніпровської міської ради (далі – Підприємство) спільно з експертами Консорціуму «ІТ ОТГ» провели комплексне дослідження та розробку стратегічних рішень для забезпечення стійкості критичної інфраструктури міста.

У межах зазначеної співпраці для Підприємства розроблено та прийнято до впровадження Заходи та Стратегію щодо підвищення стійкості систем, що базуються на глибокому аналізі 19 операційних та 4 ХБРЯ-ризиків. Ключовими результатами, що прийняті Підприємством до практичного використання, є:

1. Технічні рішення з енергонезалежності – алгоритми впровадження «насосів блекауту» для забезпечення роботи високовольтних агрегатів від автономних джерел живлення та плани 100% забезпечення КНС надійними джерелами енергопостачання з АВР.

2. Хімічна безпека – комплексний план повного переходу зі зрідженого хлору на безпечну технологію виробництва гіпохлориту натрію безпосередньо на об'єктах Підприємства.

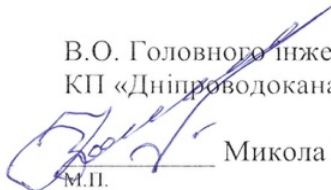
3. Цифрові інструменти управління – відкалібрована гідравлічна модель міста та ГІС-база даних, що дозволяють здійснювати прогнозне моделювання кризових сценаріїв та оптимізувати роботу мереж в особливий період.

Науково-методологічний супровід та участь у розробці зазначених заходів здійснювалися за безпосередньої участі фахівців Консорціуму «ІТ ОТГ» та експерта Потапенко Світлани Павлівни. Підприємством було забезпечено умови для проведення польових досліджень, збору технічних даних та практичної апробації алгоритмів створення знеособлених гідравлічних моделей.

Результати досліджень та впроваджена Стратегія мають високу практичну значущість для підвищення стійкості об'єктів критичної інфраструктури м. Дніпро в умовах збройної агресії, забезпечуючи надійність водопостачання та водовідведення для мешканців міста.

Цей Акт підтверджує, що результати наукової роботи Потапенко С.П. інтегровані у виробничу діяльність Підприємства та використовуються при плануванні заходів з модернізації систем життєзабезпечення міста.

В.О. Головного інженера
КП «Дніпроводоканал» ДМР


М.П. Микола ВОЛОШАНОВСЬКИЙ

Від Виконавця
від групи експертів:


М.П. Лілія БАТРАК

Додаток В1

Аналіз ризиків для систем питного водопостачання та водовідведення міста Дніпро в умовах надзвичайних ситуацій та воєнного стану

Цей звіт представляє результати аналізу ризиків для систем централізованого водопостачання та водовідведення міста Дніпро, що перебуває на балансі КП «Дніпроводоканал», з акцентом на загрозах, що виникають внаслідок надзвичайних ситуацій та бойових дій.

Метою дослідження є ідентифікація та аналіз потенційних загроз, моделювання сценаріїв їх розвитку та розробка конкретних превентивних і компенсаторних заходів для забезпечення стійкості систем.

До аналізу не включені питання планового зносу інфраструктури, окрім випадків, коли їх технічний стан може стати обтяжуючим фактором при реалізації кризових сценаріїв (наприклад, пошкодження ветхих мереж внаслідок гідроударів при аварійному переключенні потоків). Основою для аналізу є технічні дані, надані КП «Дніпроводоканал», та розуміння операційної залежності міста від трьох основних джерел води: Кайдакської НФС, Ломівської НФС та Аульської НФС.

ІДЕНТИФІКОВАНИЙ ПЕРЕЛІК РИЗИКІВ

На основі аналізу наданих даних та карти ризиків, було ідентифіковано наступний перелік ключових загроз для систем централізованого водопостачання/водовідведення м. Дніпро в умовах надзвичайних ситуацій та бойових дій, який представлений в таблиці 1.

Таблиця 1 – Перелік ідентифікованих ризиків

№ Ризику	ID	Найменування ризику
1	P-01	Неможливість застосування одного або декількох джерел водопостачання
2	P-02	Зниження рівня води в джерелі
3	P-03	Різне погіршення якості вихідної води
4	P-04	Знеструмлення насосних станцій I та II підйомів на водозаборах
5	P-05	Руйнування системи знезараження (хлорне господарство)
6	P-06	Відсутність коагулянтів та флокулянтів для очищення води
7	P-07	Руйнування основних споруд очищення на ВОС та КОС
8	P-08	Знеструмлення або руйнування підвищувальних насосних станцій
9	P-09	Знеструмлення або руйнування каналізаційних насосних станцій та очисних споруд
10	P-10	Руйнування головних каналізаційних колекторів
11	P-11	Аварійний скид забруднювачів від промислових підприємств
12	P-12	Відсутність критичних матеріально-технічних ресурсів (паливо, запчастини)
13	P-13	Обмежена можливість доступу/перебування персоналу на об'єктах
14	P-14	Критичний брак кваліфікованого персоналу
15	P-15	Критична помилка оперативного персоналу
16	P-16	Внутрішній саботаж
17	P-17	Хакерська атака на системи управління SCADA
18	P-18	Хакерська атака на білінгові та клієнтські системи
19	P-19	Внутрішнє перехресне забруднення системи водопостачання

Проведений аналіз ризиків для систем водопостачання та водовідведення м. Дніпро в умовах надзвичайних ситуацій та воєнного стану дозволяє зробити низку узагальнюючих висновків.

В цілому система водопостачання має певний рівень стійкості завдяки наявності кількох джерел водопостачання, значному резерву потужностей очисних споруд та розгалуженій мережі резервуарів чистої води. Однак, існує низка критичних вразливостей, які можуть призвести до важких, а в деяких випадках – катастрофічних наслідків для життєдіяльності міста.

Класифікація ризиків за рівнем загрози

Всі проаналізовані ризики можна умовно згрупувати за потенційним впливом:

Критичні ризики (з катастрофічними наслідками): це загрози, що можуть призвести до повної або майже повної зупинки надання послуг для значної частини міста на тривалий час, або становлять пряму загрозу життю та здоров'ю населення. До цієї групи належать:

- Ризик 5: Руйнування хлорного господарства. (Подвійна загроза: хімічна небезпека та зупинка водопостачання).
- Ризик 3: Різке погіршення якості води в джерелі. (Загроза масових отруєнь).
- Ризик 1: Одночасна втрата кількох джерел водопостачання. (Колапс системи).
- Ризик 8 та 10: Масштабна відмова системи водовідведення. (Санітарна та екологічна катастрофа).

Високопріоритетні ризики (з важкими наслідками): це загрози, що безумовно призведуть до серйозних перебоїв у наданні послуг, вимагатимуть значних ресурсів для ліквідації та можуть тривати кілька діб. До цієї групи належать:

- Ризик 4: Знеструмлення насосних станцій I-підйому. (Повна зупинка водозабору).
- Ризик 6: Відсутність коагулянтів. (Зупинка процесу очищення).
- Ризик 12: Відсутність палива. (Параліч аварійних служб та резервного живлення).
- Ризик 17: Кібератака на SCADA. (Втрата керованості та підвищення ризиків техногенної аварії).

Помірні ризики (з локальними, але частими наслідками): це загрози, що впливають на окремі райони, але можуть виникати часто, створюючи постійну напругу для системи та споживачів.

- Ризик 9: Відмова підвищувальних насосних станцій (ПНС).
- Ризик 7: Часткове руйнування споруд ВОС та КОС.

Пріоритетні стратегічні напрямки для підвищення стійкості

На основі аналізу визначено чотири ключові напрямки, інвестиції в які дозволять найбільш ефективно знизити найважливіші ризики:

1. Стратегічний пріоритет №1 – Хімічна та біологічна безпека:

- Завдання: Повністю усунути ризик масштабного викиду хлору та гарантувати надійне знезараження води.
- Рішення: Розробка та реалізація програми повної відмови від використання газоподібного хлору з переходом на виробництво гіпохлориту натрію на місці. Створення резервних систем знезараження на базі гіпохлориту кальцію/натрію. Посилення систем моніторингу якості води.

2. Стратегічний пріоритет №2 – Енергетична незалежність:

- Завдання: Забезпечити гарантовану роботу ключових об'єктів під час тотальних блекаутів.
- Рішення: Вирішення проблеми невідповідності напруги генераторів та високовольтних насосів на станціях I-підйому шляхом встановлення спеціальних "насосів блекауту" або високовольтних генераторів. Забезпечення 100% КНС та ПНС надійними джерелами автономного живлення та запасом палива.

3. Стратегічний пріоритет №3 – Операційна гнучкість та керованість:

- Завдання: Підвищити здатність системи адаптуватися до нештатних ситуацій та мінімізувати вплив людського фактору.

- Рішення: Створення та калібрування повноцінної гідравлічної моделі міста для прорахунку кризових сценаріїв. Впровадження секціонування мережі для можливості ізоляції окремих районів. Максимальна автоматизація та дистанціалізація процесів для зменшення залежності від присутності персоналу на небезпечних ділянках. Посилення кіберзахисту технологічних мереж.

4. Стратегічний пріоритет №4 – Матеріально-технічне забезпечення:

- Завдання: Гарантувати наявність ресурсів для ліквідації будь-яких аварій.

- Рішення: Створення захищених та географічно розосереджених стратегічних запасів палива, реагентів (включаючи спеціальні), труб, засувок та уніфікованих запчастин.

Реалізація заходів за вказаними чотирма напрямками дозволить системі водопостачання та водовідведення м. Дніпро не лише протистояти викликам воєнного часу, але й закладе фундамент для її сталого та безпечного розвитку в майбутньому.

Додаток В2

Додаткові заходи щодо підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення міста Дніпро з урахуванням цілей сталого розвитку

1. Стійкість та сталий розвиток: синергія підходів в умовах кризових ситуацій

У попередніх розділах звіту було детально проаналізовано ризики для систем водопостачання та водовідведення м. Дніпро та запропоновано комплекс заходів, спрямованих на оперативне реагування та мінімізацію їх наслідків. Такі заходи є критично важливими для забезпечення стійкості систем в умовах війни та надзвичайних ситуацій.

Водночас, сучасний підхід до відновлення критичної інфраструктури, відомий як «Відбудувати краще, ніж було», наголошує на необхідності інтеграції принципів сталого розвитку в заходи з підвищення стійкості систем життєзабезпечення. Це означає, що кожна дія, спрямована на посилення надійності систем, має розглядатися через призму її довгострокового впливу на енергоефективність, екологічну безпеку, раціональне використання ресурсів та економічну доцільність.

У цьому розділі наведений перелік додаткових заходів, які враховують також Цілі сталого розвитку ООН (ЦСР). Такий підхід дозволяє досягти синергетичного ефекту: заходи, що впроваджуються для забезпечення роботи в кризових умовах, одночасно сприятимуть модернізації та підвищенню ефективності функціонування систем в мирний час.

2. Цілі сталого розвитку: глобальний контекст та національні пріоритети

Цілі сталого розвитку (ЦСР) - це комплект документів, який включає 17 взаємопов'язаних глобальних цілей, розроблених та ухвалених усіма 193 країнами-членами Організації Об'єднаних Націй у 2015 році. Вони є основою «Порядку денного у сфері сталого розвитку до 2030 року» і всеосяжним заклик до дій, спрямованих на подолання бідності, захист планети, забезпечення здоров'я, миру та процвітання для всіх людей.

На відміну від попередніх програм розвитку, ЦСР наголошують на комплексному підході, визнаючи, що дії в одній сфері (наприклад, покращення санітарії) безпосередньо впливають на результати в інших (наприклад, охорона здоров'я, стан екосистем, економічне зростання).

Нормативна база та стандарти:

► *Глобальний рівень:* ЦСР закріплені в Резолюції Генеральної Асамблеї ООН A/RES/70/1 «Перетворення нашого світу: Порядок денний у галузі сталого розвитку на період до 2030 року». Кожна з 17 цілей деталізується у 169 конкретних завданнях та 232 показниках для моніторингу прогресу.

► *Галузеві стандарти:* для сектору водопостачання та водовідведення виконання завдань ЦСР 6 спирається на конкретні міжнародні та регіональні стандарти. Ключовими є Керівні принципи ВООЗ щодо якості питної води та Директиви Європейського Союзу, зокрема Директива (ЄС) 2020/2184 про якість води, призначеної для споживання людиною. Ці документи встановлюють чіткі параметри безпеки, вимоги до моніторингу та підходи, засновані на оцінці ризиків, які вважаються загальновизнаними стандартами у водному секторі.

► *Національний рівень:* Україна інтегрувала ЦСР у свою національну політику. Указом Президента України від 30.09.2019 р. №722/2019 «Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року» визначено національну систему цілей, завдань та показників. Процес євроінтеграції

України також передбачає гармонізацію національного законодавства, зокрема Водного кодексу та санітарних норм (ДСанПіН), із відповідними Директивами ЄС.

Отже, орієнтація на ЦСР - це не лише дотримання глобальних тенденцій, а й прямий шлях до впровадження найкращих світових стандартів у діяльність підприємств водопостачання/водовідведення, що підвищує їх інвестиційну привабливість та забезпечує довгострокову сталість.

3. Пріоритетні ЦСР для систем питного водопостачання та водовідведення м. Дніпро

Для розробки додаткових заходів було виділено декілька ключових ЦСР, що безпосередньо стосуються функціонування систем водопостачання та водовідведення.

ЦСР 6: «Чиста вода та належні санітарні умови» - профільна ціль, що охоплює всі аспекти діяльності. В контексті стійкості особливу важливість мають її завдання:

- **6.1:** Забезпечення загального доступу до безпечної питної води (в умовах НС надзвичайних ситуацій - через резервні та децентралізовані джерела).
- **6.2:** Забезпечення доступу до санітарних послуг (недопущення колапсу системи водовідведення).
- **6.3:** Поліпшення якості води шляхом зменшення забруднення природних джерел (захист від скидів неочищених стоків під час блекаутів тощо).
- **6.4:** Істотне підвищення ефективності водокористування (зменшення втрат води в мережах, що знижує навантаження на систему та енергоспоживання).

ЦСР 7: «Доступна та чиста енергія» - безпосередньо пов'язана з енергетичною незалежністю систем. Завдання **7.3** (подвоєння темпів підвищення енергоефективності) є ключовою, оскільки більш енергоефективне обладнання потребує менш потужних і менш витратних автономних джерел живлення.

ЦСР 9: «Промисловість, інновації та інфраструктура» - Завдання **9.1** щодо розвитку якісної, надійної, стійкої та життєздатної інфраструктури є основою для модернізації систем водопостачання/водовідведення.

ЦСР 11: «Стійкі міста і громади» - ціллю Завдання **11.5** є суттєве скорочення збитків, спричинених внаслідок катастрофічних (надзвичайних) ситуацій, пов'язаних з водою, з акцентом на захист населення.

4. Інтеграція ЦСР у заходи зі зниження ризиків

На основі вищезазначених цілей, пропонується доповнити раніше визначені заходи наступними діями, згрупованими за функціональними напрямками.

4.1. Енергетична ефективність та автономність (ЦСР 7, ЦСР 6)

Цілі (заходи по ризиках P-04, P-08, P-09): забезпечення об'єктів автономними джерелами живлення (генераторами) для роботи під час знестримлень.

Додаткові заходи на основі ЦСР:

1) **Комплексна модернізація насосного обладнання при встановленні генераторів.** Як зазначено в аналізі ризику P-04, багато насосних агрегатів є високовольтними та застарілими. Встановлення генераторів потребує переходу на низьковольтне обладнання.

Дія: не обмежуватися лише заміною двигунів, а проводити повний енергоаудит та замінювати насосні агрегати в комплекті (насос + двигун) на сучасні, енергоефективні моделі, що відповідають реальним гідравлічним режимам роботи.

Ефект:

- *Стійкість*: нові насоси будуть відповідати потужності генераторів, забезпечуючи стабільну роботу в автономному режимі.

- *Сталий розвиток (ЦСР 7.3)*: значне зниження споживання електроенергії (до 20-40%) в нормальному режимі роботи, що призведе до суттєвої економії коштів. Зменшення споживання пального генераторами під час блекаутів.

2) Впровадження відновлюваних джерел енергії для малих об'єктів.

Дія: для невеликих підвищувальних (ПНС) та каналізаційних (КНС) насосних станцій потрібно розробити програму встановлення сонячних фотоелектричних станцій з акумуляторними батареями.

Ефект:

- *Стійкість*: забезпечення базового рівня живлення для роботи автоматики та насосів малої потужності навіть за відсутності палива для генераторів.

- *Сталий розвиток (ЦСР 7)*: зниження операційних витрат та вуглецевого сліду (сукупність викидів усіх парникових газів у перерахунку на еквівалент CO₂) підприємства.

4.2. Ефективне використання водних ресурсів (ЦСР 6.4)

Цілі (заходи по ризику P-01): створення стратегічного та децентралізованого запасу води.

Додаткові заходи на основі ЦСР: **Розробка та впровадження комплексної програми зниження втрат води.** Згідно з попереднім звітом, втрати води в мережах сягають майже 40 %, що є критичним показником.

Дія: пріоритезувати заходи, що зменшують загальний обсяг води, який необхідно підняти, очистити та транспортувати. Це включає:

- зонування мережі та встановлення зонних комерційних лічильників для точного визначення ділянок з найбільшими втратами.

- розробка програма 100% оснащення домогосподарств приладами обліку, що стимулює економне споживання.

- закупівля сучасного обладнання для пошуку прихованих витоків (корелятори, акустичні датчики).

Ефект:

- *Стійкість*: зменшення добового споживання води означає, що наявних запасів в РЧВ та потужності генераторів вистачить на довший період автономної роботи; зниження навантаження на всю систему.

- *Сталий розвиток (ЦСР 6.4)*: пряма економія ресурсів (вода, електроенергія, реагенти) та фінансів підприємства.

4.3. Якість води та захист екосистем (ЦСР 6.1, 6.3)

Цілі (заходи по ризиках P-03, P-05): створення запасу реагентів, розробка планів реагування на ХБРЯ-загрози, перехід з хлору на гіпохлорит натрію.

Додаткові заходи на основі ЦСР: **Модернізація технологій очищення води з впровадженням додаткових бар'єрів.**

Дія: розробити довгострокову програму модернізації очисних споруд, що передбачає впровадження додаткових ступенів очищення, зокрема УФ-знезараження води.

Ефект:

- *Стійкість:* УФ-знезараження є ефективним проти широкого спектру патогенів, стійких до хлору (зокрема, *Cryptosporidium*), створює додатковий бар'єр при недостатній ефективності первинного знезараження, що підвищує надійність системи проти біологічних загроз.

- *Сталий розвиток (ЦСР 6.1, 6.3):* покращення якості питної води, зменшення ризику утворення побічних продуктів хлорування.

4.4. Надійність системи водовідведення та громадське здоров'я (ЦСР 6.2, ЦСР 11.5)

Цілі (заходи по ризиках P-09, P-10): забезпечення КНС та КОС автономним живленням електроенергії, створення запасу матеріалів для ремонту колекторів.

Додаткові заходи на основі ЦСР: **Впровадження програми превентивної діагностики та санації колекторів.**

Дія: замість реагування на руйнування колекторів, впровадити проактивний підхід:

- Регулярна телеінспекція (CCTV) найбільш старих та аварійних ділянок магістральних колекторів для оцінки їх стану.

- Застосування сучасних безтраншейних методів санації (релейнінгу) для відновлення несучої здатності та герметичності колекторів без масштабних розкопок.

Ефект:

- *Стійкість:* значне зниження вірогідності раптового руйнування колектора, що є однією з найбільш катастрофічних за наслідками подій.

- *Сталий розвиток (ЦСР 6.2, 11.5):* продовження терміну служби інфраструктури, зменшення ризиків для громадського здоров'я та довкілля, мінімізація витрат у порівнянні з повною заміною колекторів.

4.5. Цифровізація, моделювання та оптимізація (ЦСР 6.4, ЦСР 9.1, ЦСР 11)

Цілі (заходи по ризиках P-01, P-17): Підвищення керованості та операційної гнучкості системи

Додаткові заходи на основі ЦСР:

1) **Створення єдиної геоінформаційної системи (ГІС) та гідравлічної моделі (ГМ).**

Дія: провести повну інвентаризацію та паспортизацію всіх активів (мереж, споруд, обладнання); на основі цих даних створити сучасну ГІС. На базі ГІС розробити та відкалібрувати повноцінну гідравлічну модель систем водопостачання та водовідведення.

Ефект:

- *Стійкість:* ГМ дозволяє моделювати кризові сценарії (відключення насосних станцій, руйнування водогонів) та заздалегідь розробляти оптимальні протоколи реагування, що скорочує час прийняття рішень та мінімізує наслідки.

- *Сталий розвиток (ЦСР 6.4, 9.1):* ГІС та ГМ є інструментами для оптимізації роботи системи в нормальному режимі: виявлення зон з надлишковим тиском, оптимізація режимів роботи насосів, планування реконструкції мереж.

2) Розробка Схеми оптимізації систем питного водопостачання та водовідведення.

Дія: на основі створеної ГМ розробити, погодити та затвердити Схему оптимізації.

Ефект:

- *Стійкість:* Схема оптимізації стане офіційним документом, що обґрунтовує необхідні інвестиції в підвищення надійності та ефективності системи.
- *Сталий розвиток:* дозволить залучати фінансування для планомірної модернізації та розвитку інфраструктури на основі технічно та економічно обґрунтованих рішень.

4.6. Фізичний захист об'єктів та персоналу в умовах бойових дій (ЦСР 11.5, ЦСР 6)

Цілі (заходи по ризиках P-01, P-05, P-07) Інженерний захист ключових вузлів.

Додаткові заходи на основі ЦСР: Комплексна програма фізичного захисту інфраструктури та персоналу.

Дія: розширити існуючі заходи з інженерного захисту, включивши:

- укріплення та, за можливості, заглиблення критичних вузлів (насосних станцій, хлораторних, диспетчерських пунктів).
- будівництво або модернізація бомбосховищ для захисту оперативного персоналу, що забезпечить можливість продовжувати управління системою під час повітряних тривог.
- встановлення пасивних засобів захисту, таких як протидронні сітки, над ключовими відкритими спорудами (РЧВ, відстійники).

Ефект:

- *Стійкість:* пряме зниження вірогідності руйнування обладнання та ураження персоналу, що є ключовою умовою збереження працездатності систем під час бойових дій.
- *Сталий розвиток (ЦСР 11.5):* підвищення загальної стійкості міської інфраструктури до катастрофічних та надзвичайних ситуацій.

5. Узагальнений перелік додаткових заходів

№	Назва заходу	Пов'язані ризики	Ключові ЦСР	Обґрунтування очікуваний ефект	та Пріоритет
1	Комплексний енергоаудит та заміна насосних агрегатів на енергоефективні низьковольтні моделі	P-04, P-08, P-12	ЦСР 7.3, ЦСР 6.4	Забезпечує сумісність з генераторами, знижує споживання пального/електроенергії. Зменшує операційні витрати та підвищує надійність автономної роботи.	Високий
2	Встановлення сонячних електростанцій з акумуляторами на малих об'єктах (ПНС, КНС)	P-08, P-09, P-12	ЦСР 7	Створює додатковий рівень енергетичної стійкості, що не залежить від постачання палива. Знижує операційні витрати.	Середній

3	Розробка та реалізація комплексної програми зниження втрат води (зонування, 100% облік, пошук витоків)	P-01, P-02, P-04	ЦСР 6.4	Знижує загальне навантаження на систему, дозволяючи довше працювати в автономному режимі на наявних запасах води та потужності генераторів. Прямі економії ресурсів.	Високий
4	Розробка програми модернізації технології очищення води з впровадженням УФ-знезараження	P-03, P-05, P-20	ЦСР 6.1, ЦСР 6.3	Створює додатковий надійний бар'єр проти біологічних загроз, стійких до хлору. Підвищує гарантії безпеки питної води як в умовах НС, так і в мирний час.	Середній
5	Впровадження програми превентивної діагностики (CCTV) та санації (релейнінг) критичних ділянок колекторів	P-10, P-09	ЦСР 6.2, ЦСР 11.5	Проактивно знижує вірогідність катастрофічного руйнування колекторів. Є економічно ефективнішим за ліквідацію наслідків аварії. Забезпечує довгострокову надійність системи водовідведення.	Високий
6	Створення ГІС, гідравлічної моделі та розробка Схеми оптимізації	P-01, P-10, P-17, P-04	ЦСР 6.4, ЦСР 9.1, ЦСР 11	Фундаментальний інструмент для прийняття обґрунтованих рішень, моделювання кризових сценаріїв та планування розвитку. Забезпечує перехід від реактивного до проактивного управління інфраструктурою.	Дуже високий
7	Реалізація програми фізичного захисту об'єктів (укріплення, бомбосховища, протидронні сітки)	P-01, P-05, P-07, P-13	ЦСР 11.5, ЦСР 6	Пряме зниження вразливості до кінетичних загроз. Забезпечує збереження обладнання та безпеку персоналу, що є необхідною умовою для функціонування системи під час бойових дій.	Високий

Додаток ВЗ

Розробка матриці ризиків для систем питного водопостачання та водовідведення міста Дніпро

ПРИНЦИПИ АРХІТЕКТУРИ УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ

Управління ризиками в контексті критичної інфраструктури

Функціонування систем централізованого водопостачання та водовідведення є основою життєзабезпечення будь-якого сучасного міста та, згідно із Законом України «Про критичну інфраструктуру» (№ 1882-IX), належить до життєво важливих послуг. В умовах воєнного стану, коли об'єкти критичної інфраструктури стають цілями для ворожих атак, а загальний рівень невизначеності є надзвичайно високим, застосування хаотичних чи ситуативних підходів до управління ризиками є неприпустимим. Необхідність переходу до структурованої, системної та проактивної моделі управління ризиками стає безальтернативною вимогою для забезпечення стійкості та безперервності надання послуг.

Для комунального підприємства «Дніпроводоканал» основними цілями є безперебійне постачання споживачам питної води, якість якої відповідає санітарним нормам (ДСанПіН 2.2.4-171-10), та надійне відведення й очищення стічних вод. Відповідно, будь-яка подія чи обставина, що створює невизначеність щодо досягнення вказаних цілей, є ризиком і підлягає ідентифікації, аналізу та обробці.

Фундаментальні принципи ефективного управління ризиками

Адаптація восьми фундаментальних принципів, які наведені нижче, до конкретних умов КП «Дніпроводоканал» є основою для побудови дієвої архітектури управління.

Інтегрований: управління ризиками не розглядається як окрема, ізольована функція, а має бути невід'ємною частиною всіх організаційних процесів: від розробки довгострокової стратегії модернізації та інвестиційного планування до щоденних операційних процедур, таких як контроль якості води, обслуговування мереж тощо.

► **Структурований та всеохоплюючий:** застосування послідовного та комплексного підходу до аналізу ризиків забезпечує повноту, об'єктивність та порівнянність результатів. Цей звіт складений з урахуванням такого підходу, де всі ідентифіковані загрози аналізуються за єдиною методологією.

► **Індивідуалізований (Customized):** загальні принципи управління ризиками адаптовані до конкретних зовнішніх та внутрішніх умов КП «Дніпроводоканал». При цьому враховується географічне розташування водозаборів, специфіка промислового оточення (зокрема, об'єктів у м. Кам'янське), наявність об'єктів підвищеної небезпеки вище за течією Дніпра та, найголовніше, необхідність безпеки під час воєнного стану.

► **Інклюзивний:** якість аналізу ризиків прямо залежить від залучення широкого кола зацікавлених сторін та експертів. Підготовка цього звіту базувалася на попередніх дослідженнях, до яких були залучені технологи з водопідготовки, експерти з якості води, фахівці з експлуатації мереж, гідравліки та GIS-експерти, що забезпечило всебічний розгляд ймовірних загроз.

► **Динамічний:** ризики не є статичними, вони постійно змінюються, з'являються нові загрози (наприклад, нові типи озброєнь чи кібератак), а пріоритетність існуючих може змінюватися. Система управління ризиками повинна бути гнучкою, щоб своєчасно виявляти ці зміни та реагувати

на них. Цей звіт є актуальним знімком поточного стану ризиків, який потребує регулярного перегляду та оновлення.

► **Найширша доступна інформація:** рішення в рамках управління ризиками ґрунтуються на аналізі всієї доступної інформації, включаючи дані попередніх звітів, результати наукових досліджень, статистику аварійності, технічні регламенти, а також міжнародні стандарти та практики, такі як Керівництво ВООЗ щодо якості питної води та рекомендації Агенції з охорони довкілля США (EPA).

► **Людські та корпоративні чинники:** визнається, що поведінка людей та корпоративна культура суттєво впливають на всі аспекти управління ризиками. Такі загрози, як критична помилка оперативного персоналу (Ризик 16), брак кваліфікованих кадрів (Ризик 17) та внутрішній саботаж (Ризик 18), ідентифіковані як значущі та включені до аналізу.

► **Постійне вдосконалення:** управління ризиками є ітеративним процесом, спрямованим на постійне вдосконалення. Кожен цикл аналізу, реагування та моніторингу, результати якого представлені в цьому звіті, збагачує досвід організації та робить її систему управління більш досконалою та ефективною.

Процес управління ризиками: покрокова модель

Цей звіт є результатом застосування ітеративного процесу управління ризиками, визначеного стандартом ДСТУ ISO 31000:2018. Процес включає наступні послідовні етапи :

► **Обмін інформацією та консультації:** цей наскрізний процес забезпечує залучення всіх зацікавлених сторін та експертів на кожному етапі для отримання повної та достовірної інформації.

Визначення сфери застосування, контексту та критеріїв:

▪ **сфера застосування:** система централізованого водопостачання та водовідведення м.Дніпро, яка перебуває на балансі КП «Дніпроводоканал»;

▪ **контекст:** зовнішній – воєнний стан, наявність промислових та аграрних об'єктів у басейні р. Дніпро; внутрішній – технічний стан інфраструктури, залежність від трьох основних джерел води, кваліфікація персоналу;

▪ **критерії:** шкали для оцінки ймовірності та наслідків ризиків, визначені у табл. 1.1 цього звіту.

Оцінювання ризику (це ключовий етап, що складається з трьох компонентів):

▪ **ідентифікація ризику:** відповідь на питання "Що може статися, де, коли і чому?". Цей етап реалізовано у розд. 2 шляхом створення комплексного реєстру ризиків на основі аналізу попередньо розроблених звітів.

▪ **аналіз ризику:** визначення та оцінка ймовірності настання ідентифікованих подій та масштабу їхніх наслідків;

▪ **власне оцінювання ризику:** порівняння результатів аналізу з розробленими критеріями для визначення рівня ризику та його пріоритетності для подальшої обробки.

► **Обробка ризику:** вибір та впровадження заходів для управління ризиками. Існує кілька стратегій обробки: уникнення ризику, зменшення (ймовірності або наслідків), передача (наприклад, через страхування) або свідоме прийняття ризику.

► **Моніторинг та перегляд:** постійний процес відстеження ризик-ландшафту, ефективності впроваджених заходів та виявлення нових загроз.

► **Документування та звітність:** цей звіт є формальним результатом процесу, що фіксує методологію, результати аналізу та є основою для розробки подальших дій.

Критерії оцінювання ризиків

Для забезпечення структурованого та об'єктивного аналізу необхідно перевести якісні описи загроз, наведені у вихідних документах, у кількісно-порівняльну систему. Це дозволяє послідовно оцінювати та порівнювати різноманітні за своєю природою ризики на єдиній шкалі.

Простий підхід до оцінки наслідків за шкалою "низький-середній-високий" є недостатнім для комплексної системи, якою є водоканал. Наприклад, ризик руйнування складу хлору (P-05) має катастрофічні наслідки для здоров'я населення та безперервності послуг, тоді як ризик хакерської атаки на білінгову систему (P-18) несе переважно фінансові та репутаційні збитки. Щоб адекватно порівняти ці загрози, необхідна багатовимірна шкала наслідків, що оцінює потенційну шкоду одночасно за кількома ключовими доменами: вплив на здоров'я та безпеку населення (відповідно до ДСанПіН 2.2.4-171-10), безперервність надання послуг, екологічна шкода, фінансові втрати та репутаційна шкода. Для кожного ризику визначається найвищий рівень наслідків за будь-яким із цих доменів, і саме цей рівень використовується для його позиціонування на матриці. Такий підхід забезпечує цілісну та повну пріоритизацію.

На основі аналізу наданих матеріалів та стандартів розроблено наступні критерії оцінювання.

Таблиця 1 – Критерії ранжування вірогідності, ймовірності та наслідків

Рівень	Вірогідність	Ймовірність	Опис ймовірності	Наслідки	Опис наслідків (оцінюється найгірший показник з усіх доменів)
5	Висока	Майже напевно	Подія відбувається часто, майже напевно у даних умовах	Катастрофічні	Здоров'я: летальні випадки серед населення. Послуги: повний колапс системи водопостачання/водовідведення міста. Екологія: незворотна екологічна катастрофа регіонального масштабу. Фінанси: втрати > €10,000,000. Репутація: втрата ліцензії, кримінальні провадження проти керівництва.
4	Висока	Ймовірно	Подія очікувана кілька разів на рік у даних умовах	Важкі	Здоров'я: масові отруєння/захворювання, що потребують госпіталізації, без летальних наслідків. Послуги: припинення водопостачання/водовідведення для >100,000 людей на >3 доби. Екологія: довготривала (роки) шкода екосистемі річки. Фінанси: втрати €1,000,000-10,000,000. Репутація: втрата довіри на національному рівні, значні штрафи.
3	Середня	Можливо	Подія можлива, очікується раз на 5–10 років	Значні	Здоров'я: окремі випадки отруєнь/захворювань, що не потребують госпіталізації. Послуги: припинення водопостачання/водовідведення для 10,000-100,000 людей на 1-3 доби. Екологія: значне, але локалізоване забруднення, що потребує заходів з відновлення. Фінанси: втрати €100,000-€1,000,000. Репутація: негативні публікації в національних ЗМІ, офіційні розслідування.

2	Низька	Малоймовірно	Подія малоймовірна, очікується рідко	Помірні	Здоров'я: погіршення органолептичних властивостей води без загрози здоров'ю. Послуги: припинення водопостачання/ водовідведення для <10,000 людей на <24 год. Екологія: локальне забруднення без довготривалих наслідків. Фінанси: втрати €10,000-€100,000. Репутація: негативні публікації в місцевих ЗМІ.
1	Низька	Майже неможливо	Очікується рідше ніж 1 раз на 10 років	Незначні	Здоров'я: немає впливу. Послуги: локальні незручності, короткочасне зниження тиску. Екологія: немає впливу. Фінанси: втрати < €10,000. Репутація: поодинокі скарги споживачів.

КОМПЛЕКСНИЙ РЕЄСТР РИЗИКІВ ДЛЯ КП «ДНІПРОВИДОКАНАЛ»

На основі розроблених раніше звітів та застосування методології, описаної раніше, було ідентифіковано, систематизовано та оцінено ключові ризики для систем водопостачання та водовідведення м. Дніпро. Цей реєстр є центральним елементом аналізу, що об'єднує розрізнені загрози в єдину структуровану базу даних для подальшої пріоритизації.

Оцінка ризиків у реєстрі враховує, що операційний ризик, такий як "Різка погіршення якості вихідної води" (P-03), насправді є категорією, що об'єднує безліч специфічних загроз. Ці загрози походять з різних джерел, таких як застосування зброї масового ураження, ураження конвенційною зброєю небезпечних об'єктів (наприклад, Придніпровського хімічного заводу), аварійні скиди з промислових підприємств, змив агрохімікатів з полів або природні явища, такі як "цвітіння" води з утворення ціанотоксинів. Така комбінація дозволяє більш точно оцінити кумулятивну ймовірність та розробити цільові заходи реагування.

Особливу увагу приділено каскадним ризикам. Наприклад, ризик "Вторинне забруднення через ре-мобілізацію донних відкладів" (P-23) є унікальним прикладом такого ефекту. Історичне промислове та радіоактивне забруднення, що накопичилося на дні Дніпровського водосховища, є "сплячою" загрозою. Потужний зовнішній тригер, такий як руйнування греблі або серія вибухів в акваторії, може миттєво вивільнити ці концентровані забруднювачі, створюючи сценарій забруднення, що значно перевищує можливості існуючих очисних споруд. Цей ризик став особливо очевидним після підриву Каховської ГЕС, що продемонструвало реальність подібних сценаріїв.

Таблиця 2 – Комплексний реєстр та оцінка ризиків для системи водопостачання та водовідведення м. Дніпро

ID	Ризик	Детальний опис	Ймовірність (1-5)	Наслідки (1-5)	Рівень ризиків (Й*Н)
Операційно-технічні та фізичні ризики					
P-01	Неможливість застосування одного або декількох джерел водопостачання	Фізичне руйнування водозаборів, НС I-підйому КНФС, ЛНФС або магістрального водогону від Аульської водоводу внаслідок військових дій.	4 (Ймовірно)	5 (Катастрофічні)	20
P-02	Зниження рівня води в джерелі	Критичне зниження рівня води у Дніпровському водосховищі через руйнування греблі Кам'янської або Запорізької ГЕС, що унеможливило роботу водозаборів.	3 (Можливо)	5 (Катастрофічні)	15
P-03	Різне погіршення якості вихідної води	Масове забруднення р. Дніпро вище водозаборів внаслідок диверсії, військових дій, аварій на промислових об'єктах або природних явищ.	3 (Можливо)	5 (Катастрофічні)	15
P-04	Знеструмлення насосних станцій I- та II-підйому на водозаборах	Втрата обох вводів живлення на КНФС, що призводить до повної зупинки забору води через неможливість заживити високовольтні насоси від низьковольтних генераторів.	3 (Можливо)	5 (Катастрофічні)	15
P-05	Руйнування системи знезараження (хлорне господарство)	Руйнування складу хлору або хлораторної, що призводить до викиду токсичних речовин та зупинки подачі безпечної води, неможливості знезараження стічних вод у процесі їх очищення.	3 (Можливо)	5 (Катастрофічні)	15
P-06	Відсутність коагулянтів та флокулянтів для очищення води	Руйнування складів або розрив ланцюгів постачання, що унеможливило освітлення води та робить її бактеріологічно небезпечною навіть після хлорування.	3 (Можливо)	4 (Важкі)	12
P-07	Руйнування основних споруд очищення на ВОС та КОС	Руйнування нерезервованих споруд ("вузьких місць"), таких як головний змішувач або НС промивання фільтрів, що розриває технологічний ланцюг.	4 (Ймовірно)	4 (Важкі)	16
P-08	Знеструмлення або руйнування водопровідних та підвищувальних насосних станцій	Масове знеструмлення або руйнування ВНС / ПНС, що залишає без води окремі райони або райони з висотною забудовою.	4 (Ймовірно)	3 (Значні)	12

P-09	Знеструмлення або руйнування КНС та КОС	Масове знеструмлення або руйнування КНС та КОС, що призводить до неконтрольованого виливу неочищених стоків на поверхню по всьому місту.	3 (Можливо)	5 (Катастрофічні)	15
P-10	Руйнування головних каналізаційних колекторів	Руйнування магістрального колектора великого діаметру, що призводить до масштабного виливу стоків та блокування водовідведення цілого району на тривалий час.	4 (Ймовірно)	5 (Катастрофічні)	20
P-11	Аварійний скид забруднювачів від промислових підприємств	Скид токсичних речовин, що призводить до загибелі активного мулу на КОС та скиду неочищених стоків у р. Дніпро.	3 (Можливо)	4 (Важкі)	12
Ризики інфраструктурної залежності, людського фактору та кібербезпеки					
P-12	Відсутність критичних матеріально-технічних ресурсів (паливо, запчастини)	Загальнонаціональна паливна криза або розрив ланцюгів постачання, що паралізує роботу аварійних служб та систем резервного живлення.	4 (Ймовірно)	4 (Важкі)	16
P-13	Обмежена можливість доступу/перебування персоналу на об'єктах	Блокування під'їзних шляхів або інтенсивні обстріли, що унеможливають роботу персоналу та призводять до зупинки станцій.	3 (Можливо)	4 (Важкі)	12
P-14	Критичний брак кваліфікованого персоналу	Мобілізація або міграція ключових фахівців, що унеможливорює усунення складних аварій та збільшує час ліквідації пошкоджень.	4 (Ймовірно)	3 (Значні)	12
P-15	Критична помилка оперативного персоналу	Помилка оператора в умовах стресу, що призводить до гідроудару, неправильного дозування реагентів або ігнорування аварійного сигналу.	4 (Ймовірно)	3 (Значні)	12
P-16	Внутрішній саботаж	Умисні дії працівника, спрямовані на пошкодження обладнання, порушення технології або передачу інформації ворогу.	2 (Малоймовірно)	4 (Важкі)	8
P-17	Хакерська атака на системи управління SCADA	Несанкціонований доступ до систем управління з метою викликати техногенну аварію (гідроудар, неправильне дозування) або заблокувати систему.	3 (Можливо)	4 (Важкі)	12

P-18	Хакерська атака на білінгові та клієнтські системи	Атака на ІТ-системи з метою витоку персональних даних або блокування фінансових операцій, що призводить до фінансових та репутаційних збитків.	4 (Ймовірно)	2 (Помірні)	8
P-19	Внутрішнє перехресне забруднення системи водопостачання	Забруднення води безпосередньо на території ВОС (диверсія, аварія), що призводить до подачі небезпечної води в мережу одного з берегів міста.	2 (Малоймовірно)	5 (Катастрофічні)	10
<i>ХБРЯ та специфічні екологічні ризики</i>					
P-20	Застосування ЗМУ з ціллю забруднення джерела води	Умисне забруднення р. Дніпро хімічними (нервово-паралітичні речовини) або біологічними (патогени, токсини) бойовими агентами.	2 (Малоймовірно)	5 (Катастрофічні)	10
P-21	Радіоактивне забруднення внаслідок аварії на АЕС або застосування ядерної зброї	Забруднення джерела води довгоживучими радіонуклідами (Cs, Sr) внаслідок аварії на ЗАЕС або ядерного удару.	2 (Малоймовірно)	5 (Катастрофічні)	10
P-22	Забруднення внаслідок ураження конвенційною зброєю об'єктів підвищеної безпеки	Ураження хвостосховищ ПХЗ, металургійних та коксохімічних заводів у м. Кам'янське, що призводить до масового потрапляння у Дніпро радіонуклідів та важких металів .	4 (Ймовірно)	4 (Важкі)	16
P-23	Вторинне забруднення через ремобілізацію донних відкладів	Масове підняття та переміщення накопичених за тривалий час токсичних донних відкладів внаслідок руйнування греблі або потужних вибухів в акваторії .	2 (Малоймовірно)	5 (Катастрофічні)	10

МАТРИЦЯ РИЗИКІВ ДЛЯ СИСТЕМИ ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ВОДОВІДВЕДЕННЯ М. ДНІПРО

Візуалізація ризик-ландшафту

Матриця ризиків є ключовим інструментом візуалізації, що дозволяє керівництву оперативно оцінити загальний ризик-профіль підприємства та визначити пріоритети для реагування. Вона будується шляхом розміщення кожного ідентифікованого ризику (з Таблиці 2.1) на сітці 5x5 відповідно до присвоєних йому оцінок ймовірності та наслідків. Колірне кодування зон матриці допомагає чітко розмежувати рівні ризику та необхідність втручання.

- **Зелена зона (Рівень ризику 1-6):** низький ризик, загрози, що потрапляють у цю зону, вважаються прийнятними. Вони потребують періодичного моніторингу, але не вимагають негайних заходів зі зниження.

- **Жовта зона (Рівень ризику 8-12):** помірний ризик. Ці ризики потребують уваги керівництва. Необхідно розробити плани заходів щодо їх зниження до прийнятного рівня або свідомо прийняти їх з відповідним обґрунтуванням.

- **Червона зона (Рівень ризику 15-16):** високий ризик. Ризики в цій зоні є неприйнятними для підприємства. Вони вимагають розробки та впровадження термінових заходів зі зниження їх ймовірності або наслідків.

- **Темно-червона зона (Рівень ризику 20-25):** критичний ризик. Це найвищий пріоритет. Загрози в цій зоні можуть призвести до катастрофічних наслідків і вимагають негайних, рішучих дій та виділення необхідних ресурсів для їх усунення.

Таблиця 3 – Матриця ризиків 5x5 для систем водопостачання та водовідведення м.Дніпро

←Ймовірність		1 (Незначні)	2 (Помірні)	3 (Значні)	4 (Важкі)	5 (Катастрофічні)
	5 (Майже напевно)					
	4 (Ймовірно)		P-18	P-08, P-14, P-15	P-12, P-22, P-07	P-01, P-10
	3 (Можливо)				P-06, P-11, P-13, P-17	P-03, P-04, P-05, P-09, P-02
	2 (Малоймовірно)				P-16	P-19, P-20, P-21, P-23
	1 (Майже неможливо)					
		Наслідки →				

Аналіз та інтерпретація матриці ризиків

Візуалізація ризик-ландшафту на матриці дозволяє зробити кілька ключових висновків щодо вразливостей системи водопостачання та водовідведення м. Дніпро.

Аналіз критичної та високої зон ризику. У червоній та темно-червоній зонах (рівень ризику 15 і вище) сконцентровані загрози, що потенційно можуть завдати системі максимальної шкоди. Аналіз показує, що до цієї групи належать:

- ***P-01 та P-10: Неможливість застосування джерел водопостачання.*** Цей ризик має найвищий рівень (20) через поєднання високої ймовірності фізичного ураження об'єктів в умовах війни (статичні, відомі, розвідані цілі) та катастрофічних наслідків у вигляді повного припинення водопостачання для значної частини міста.

- ***P-12, P-22, P-07: Відсутність палива та ураження небезпечних об'єктів.*** Ці ризики мають рівень 16 і є прикладами загроз, де висока ймовірність події поєднується з важкими наслідками. Паливна криза є реалістичним сценарієм, що паралізує всі аварійні служби, а ураження крупних промислових об'єктів у Кам'янському призведе до масштабного хімічного та радіоактивного забруднення.

- ***P-03, P-04, P-05, P-09, P-02: Забруднення джерела, знеструмлення НС I,II-підйому, руйнування хлорного господарства, відмова КНС та КОС.*** Ці ризики мають рівень 15. Хоча їхня ймовірність оцінена як середня ("можливо"), їхні наслідки є катастрофічними. Це свідчить про наявність кількох критичних вразливостей у системі, кожна з яких може призвести до колапсу.

- **Аналіз взаємозв'язків та каскадних ефектів.** Оцінка окремих ризиків є важливою, але не повною без розуміння їх взаємозв'язків. Деякі ризики діють як "мультиплікатори", не створюючи прямої шкоди, але суттєво посилюючи наслідки інших подій.

- ***Відсутність палива (P-12) та брак кваліфікованого персоналу (P-14)*** - є класичними прикладами таких мультиплікаторів. Самі по собі вони не руйнують інфраструктуру. Однак, у разі настання іншої події, наприклад, знеструмлення (P-04, P-08, P-09) або фізичного пошкодження мереж, відсутність палива для генераторів чи фахівців для ремонту перетворює керовану аварію на довготривалу катастрофу. Це означає, що управління цими ризиками-мультиплікаторами є одним з найефективніших способів зниження загальної вразливості системи.

- ***Хакерська атака на SCADA (P-17)*** - може виступати тригером для інших ризиків. Зловмисники можуть спровокувати гідроудар, що призведе до фізичного руйнування мереж, або віддати команди, що імітують критичну помилку персоналу (P-15) або призводять до внутрішнього забруднення (P-19). Це підкреслює важливість кібербезпеки, що регулюється, зокрема, стандартом ДСТУ ISO/IEC 27005.

- ***Каскадний ефект*** - яскраво ілюструє ризик підняття донних відкладів (P-23). Тут одна подія (руйнування греблі, P-02) викликає іншу (зміна гідрології), яка, в свою чергу, активує "сплячу" загрозу (накопичені забруднювачі), що призводить до катастрофічних наслідків, які неможливо було б спровокувати початковою подією самостійно.

Отже, здійснений аналіз, результати якого наведені вище, дозволяє пріоритизувати ризики, пов'язані з системами водопостачання та водовідведення м. Дніпро, що стане основою стратегії запобігання їм та зменшення їх впливу. Після формування переліку відповідних заходів, їх можна буде ранжувати в залежності від пріоритету ризику (ризиків), з якими вони пов'язані. Такі роботи будуть здійснені на наступному етапі проекту та оформлені окремим (наступним) звітом.

Результати ідентифікації та ранжування ризиків, наведені у додатках В1–В3, використано як вихідну аналітичну основу для формування Стратегії підвищення стійкості систем централізованого водопостачання та водовідведення м. Дніпро на період до 2030 року. Пріоритетність заходів у Стратегії та Плані її реалізації визначено з урахуванням рівня ризику, потенційних наслідків для життєзабезпечення міста, можливості зниження вразливості системи та необхідності забезпечення безперервності надання послуг у надзвичайних ситуаціях і в умовах воєнного стану.

Додаток В4

СТРАТЕГІЯ

підвищення стійкості систем централізованого водопостачання та водовідведення міста Дніпро на період до 2030 року

Розділ I. Загальна частина

Ця Стратегія визначає ключові проблеми, мету та пріоритетні напрями для забезпечення надійного, безпечного та безперебійного функціонування систем централізованого водопостачання та водовідведення міста Дніпро в умовах воєнного стану та інших кризових ситуацій.

Повномасштабне вторгнення Російської Федерації призвело до цілеспрямованого руйнування об'єктів критичної інфраструктури України. Системи централізованого водопостачання та водовідведення, що є основою санітарного благополуччя мільйонного міста, стали одними з пріоритетних цілей для дестабілізації. Нові військові загрози наклалися на проблему значного фізичного зносу інфраструктури, що накопичувалася роками, створивши безпрецедентні виклики для стабільності надання послуг.

Розробка цієї Стратегії ініційована виконавчим комітетом Дніпровської міської ради та КП «Дніпроводоканал» і є частиною проєкту перехідної допомоги для розвитку «Зміцнення стійкості міст у сферах інфраструктури постачання та житла» (SUR), який фінансується BMZ та реалізується GIZ. Стратегія ґрунтується на принципах міської стійкості - здатності міської системи не лише витримувати кризи, але й адаптуватися, трансформуватися та зміцнюватися в напрямку сталого розвитку.

Розділ II. Проблема, яка потребує розв'язання

Функціонування систем централізованого водопостачання та водовідведення міста Дніпро характеризується наявністю низки критичних вразливостей, які створюють загрозу для стабільного надання життєво важливих послуг.

1. Критичний рівень зносу інфраструктури. Система водопостачання міста Дніпро є масштабною та складною інженерною мережею, що забезпечує питною водою понад мільйон мешканців та тисячі юридичних осіб. Основою системи є три потужні джерела:

- **Кайдацька насосно-фільтрувальна станція (КНФС)**, що забезпечує більшу частину правого берега з продуктивністю близько 94–99 тис. м³ на добу.
- **Ломівська насосно-фільтрувальна станція (ЛНФС)**, яка постачає воду на лівий берег обсягом 77–79 тис. м³ на добу.
- **Аульська насосно-фільтрувальна станція**, вода з якої закуповується додатково та є важливим елементом загального водного балансу міста, забезпечуючи близько 116 тис. м³ на добу.

Загальна протяжність мереж питного водопостачання, якими управляє КП «Дніпроводоканал», сягає **2 322,8 км**. Значна частина цієї інфраструктури, близько **40%**, є застарілою та потребує модернізації. Це стосується як магістральних водогонів, так і розподільних мереж, що були збудовані багато десятиліть тому.

Такий стан інфраструктури ускладнює її експлуатацію. Необхідність масштабного оновлення мереж є ключовим викликом для забезпечення ефективного, надійного та сталого водокористування для всієї громади міста.

2. Висока енергетична вразливість. Попри забезпечення більшості об'єктів генераторами, ключова проблема полягає у технічній невідповідності: основні насосні агрегати на водозаборах є високовольтними (**6/10 кВ**), тоді як наявні дизельні генератори -

низьковольтні (0,4 кВ). Це робить неможливим запуск основних насосів під час блекаутів без спеціального обладнання, що еквівалентно фізичному знищенню водозабору.

3. Хімічна небезпека та застарілі технології. Використання для знезараження зрідженого хлору створює подвійну загрозу: техногенно-хімічну та технологічну. На складах КНФС та ЛНФС може зберігатися до **30 тонн** цієї токсичної речовини відповідно. Руйнування складу може створити зону ураження з летальними концентраціями до **3–5 км**, що напряму загрожує густонаселеним житловим районам.

4. Високий рівень ідентифікованих ризиків. За результатами оцінки, існують наступні ризики: неможливість застосування джерел водопостачання та руйнування головних каналізаційних колекторів, руйнування хлорного господарства, знеструмлення водозаборів, знеструмлення КНС та КОС та відсутність палива.

5. Відсутність сучасних інструментів управління. На підприємстві відсутня сучасна відкалібрована гідравлічна модель, а існуюча Схема оптимізації, розроблена у **2012 році**, втратила актуальність. Це унеможливорює ефективне моделювання кризових сценаріїв та прийняття обґрунтованих інженерних рішень.

Комплекс зазначених проблем створює загрозу стабільному функціонуванню систем життєзабезпечення міста та потребує негайного впровадження системних, стратегічно обґрунтованих заходів.

Розділ III. Мета та строки реалізації Стратегії

Метою цієї Стратегії є підвищення стійкості та забезпечення безперебійного функціонування систем централізованого водопостачання та водовідведення міста Дніпро в умовах воєнного стану та інших кризових ситуацій, а також створення основи для їх сталого та ефективного розвитку в довгостроковій перспективі.

Реалізація Стратегії розрахована на період до **2030 року**.

Розділ IV. Напрями та шляхи досягнення мети

Ця Стратегія розроблена відповідно до підходу «Відбудувати краще, ніж було», який наголошує на інтеграції принципів сталого розвитку в заходи з підвищення стійкості. Кожна дія розглядається через призму її довгострокового впливу на енергоефективність, екологічну безпеку та раціональне використання ресурсів. Ключовими для Стратегії є:

- **ЦСР 6: «Чиста вода та належні санітарні умови»** - профільна ціль, що охоплює безпеку води, надійність санітарії та ефективність водокористування;
- **ЦСР 7: «Доступна та чиста енергія»** - пов'язана з енергоефективністю та енергетичною незалежністю систем;
- **ЦСР 9: «Промисловість, інновації та інфраструктура»** - наголошує на розвитку якісної, надійної та стійкої інфраструктури;
- **ЦСР 11: «Стійкі міста і громади»** - фокусується на скороченні збитків від надзвичайних ситуацій та захисті населення.

Досягнення мети Стратегії здійснюватиметься за чотирма взаємопов'язаними стратегічними напрямами:

1. Забезпечення хімічної та біологічної безпеки

• Шляхи реалізації:

- Повна відмова від використання зрідженого хлору шляхом переходу на виробництво гіпохлориту натрію на місці.
- Створення резервних систем знезараження на базі безпечних реагентів.
- Модернізація системи моніторингу якості води, дооснащення лабораторій сучасним обладнанням для виявлення специфічних ХБРЯ-загроз.
- Впровадження додаткових бар'єрів очищення, зокрема УФ-знезараження.

2. Підвищення енергетичної незалежності та ефективності

• Шляхи реалізації:

- Встановлення спеціальних низьковольтних «насосів блекауту» на водозаборах для забезпечення їх гарантованої роботи від генераторів.
- Забезпечення 100% каналізаційних насосних станцій (КНС) та критичних підвищувальних насосних станцій (ПНС) надійними джерелами автономного живлення.
- Проведення комплексного енергоаудиту та модернізація застарілого насосного обладнання на енергоефективні моделі.

3. Підвищення операційної гнучкості, керованості та захисту

• Шляхи реалізації:

- Створення та калібрування сучасної гідравлічної моделі міста для моделювання кризових сценаріїв та розробки протоколів реагування.
- Впровадження комплексної програми фізичного захисту ключових об'єктів (інженерні укриття, протидронні сітки).
- Посилення кіберзахисту технологічних мереж (SCADA) шляхом сегментації мереж, впровадження сучасних засобів захисту та розробки планів реагування на інциденти.
- Будівництво та модернізація укриттів для персоналу, забезпечення захищеними засобами транспортування.

4. Забезпечення надійності інфраструктури та матеріально-технічних ресурсів

• Шляхи реалізації:

- Створення захищених та географічно розосереджених стратегічних запасів палива, реагентів, труб, запчастин та ремонтних матеріалів.
- Розробка та впровадження довгострокової програми зниження втрат води, що включає зонування мереж та сучасні методи пошуку витоків.
- Впровадження програми превентивної діагностики та санації магістральних каналізаційних колекторів.

Розділ V. Очікувані результати

Реалізація Стратегії дозволить досягти таких ключових результатів:

- **Зниження вразливості** систем централізованого водопостачання та водовідведення до кінетичних загроз, блекаутів та інших кризових ситуацій, пов'язаних з воєнним станом.
- **Повна ліквідація ризику** масштабної хімічної аварії, пов'язаної зі зберіганням та транспортуванням зрідженого хлору.
- **Забезпечення гарантованої роботи** ключових об'єктів (водозаборів, КНС) в автономному режимі протягом тривалого часу.
- **Суттєве зменшення втрат води** в мережах та підвищення енергоефективності підприємства, що призведе до значної економії операційних витрат.
- **Підвищення операційної керованості** системи завдяки впровадженню сучасної гідравлічної моделі та протоколів реагування на надзвичайні ситуації.
- **Створення надійної основи** для подальшого сталого розвитку та модернізації інфраструктури відповідно до найкращих європейських практик та Цілей сталого розвитку.

Розділ VI. Індикатори ефективності реалізації Стратегії

Оцінка ефективності реалізації Стратегії здійснюватиметься на основі моніторингу таких ключових індикаторів:

- **Рівень втрат води у мережах, %** (цільовий показник - щорічне зниження).
- **Частка критичних об'єктів (КНС, НС I-го підйому), забезпечених автономним живленням, %** (цільовий показник - 100%).

- **Частка води, знезараженої без застосування зрідженого хлору, %** (цільовий показник - 100%).
- **Питомі витрати електроенергії на підйом та транспортування 1 м³ води, кВт·год/м³** (цільовий показник - щорічне зниження).
- **Кількість аварій на 1 км мереж на рік** (цільовий показник - щорічне зниження).

Розділ VII. Фінансове та організаційне забезпечення

Фінансування заходів Стратегії передбачається здійснювати за рахунок комплексного залучення коштів з різних джерел:

- коштів КП «Дніпроводоканал» (у межах тарифу та амортизаційних відрахувань);
- коштів бюджету міста Дніпро;
- коштів державного бюджету, в тому числі в рамках національних програм відновлення;
- кредитних коштів міжнародних фінансових організацій (МФО);
- грантів та міжнародної технічної допомоги (МТД).

Координація реалізації Стратегії здійснюється уповноваженим органом, визначеним Дніпровською міською радою, за участі представників КП «Дніпроводоканал», профільних департаментів міської ради, військово-цивільної адміністрації та інших зацікавлених сторін. Детальний перелік заходів, їх вартість, терміни та відповідальні виконавці визначаються у Плані реалізації, який є невід'ємним додатком до цієї Стратегії.

Додаток В5

План реалізації заходів

Стратегії підвищення стійкості систем централізованого водопостачання та водовідведення міста Дніпро на період до 2030 року

Примітки:

Джерела фінансування: Вказані потенційні джерела, що потребують подальшого залучення та структурування. Аббревіатури: КП – кошти підприємства (тариф, амортизація); МБ – бюджет міста Дніпро; ДБ – державний бюджет; МФО – кредити міжнародних фінансових організацій (ЄІБ, ЄБРР та ін.); МТД – міжнародна технічна допомога, грантові кошти.

Виконавці: Вказані ключові відповідальні сторони. Реалізація більшості капітальних проектів передбачає залучення підрядних організацій за результатами тендерних процедур.

Вартісні показники: Усі показники є орієнтовними (станом на 4 кв. 2025 р.), наведені у тис. євро без урахування ПДВ та потребують уточнення на стадії ТЕО. Вартість проектування та технічного нагляду прийнята в розмірі 7-12% від вартості проекту.

№ з/п	Стратегічний пріоритет / Напрямок ЦСР	Назва заходу / проєкту	Суть заходу та обґрунтування (включаючи зв'язок з ЦСР та стандартами ЄС)	Термін реалізації	Орієнтовна вартість, тис. грн. (без ПДВ)	Потреба у передпроектних/проектних роботах та їх вартість	Джерела фінансування (потенційні)	Виконавці	Рекомендації щодо інтеграції до Генплану
1	Хімічна та біологічна безпека (ЦСР 6.1, 6.3, 11.5)	1.1. Повна відмова від використання зрідженого хлору на ВОС та КОС	Стратегічний захід. Поетапний перехід на виробництво гіпохлориту натрію на місці шляхом електролізу розчину солі. Обґрунтування: Повністю усуває подвійний ризик: 1) хімічної катастрофи через викид десятків тон токсичної речовини	Довгостроковий (24-36 міс.)	120,607 - 168,850	Потреба: ТЕО, розробка проєкту (стадії П/ППР), ОВД. Вартість: ~8% від капітальних інвестицій (9,649 – 13,508 тис. грн.)	Кредити МФО, ДБ (Програма покращення питного водопостачання України), МБ	КП «Дніпроводок анал» (Служба капітального будівництва), Підрядні організації	Включити як стратегічний захід із забезпечення хімічної безпеки міста та захисту критичної інфраструктури.

			поблизу житлових районів; 2) технологічної зупинки водопостачання. Є заходом зі зниження військової привабливості об'єкта. Стандарти ЄС: Відповідає найкращим практикам безпеки (BAT).						
2	Хімічна та біологічна безпека (ЦСР 6.1, 6.3, 11.5)	1.2. Створення резервної системи знезараження	Створення на кожній станції фізично ізольованого та захищеного складу з менш небезпечним реагентом (гіпохлорит кальцію/натрію) та монтаж мобільних або стаціонарних установок дозування. Обґрунтування: Дозволяє відновити подачу безпечної води протягом 12-24 годин після руйнування основної системи знезараження, уникнувши повної зупинки водопостачання.	Середньо-строковий (12-18 міс.)	Потребує ТЕО	Потреба: Розробка проєкту. Вартість: ~7% від капітальних інвестицій	МТД, МБ, КП	КП «Дніпроводок анал», Технологи	Включити як обов'язковий елемент резервування на об'єктах критичної інфраструктури.
3	Хімічна та біологічна безпека (ЦСР 6.1, 6.3, 11.5)	1.3. Модернізація системи моніторингу якості води та дооснащення	Встановлення на водозаборах автоматизованих онлайн-датчиків (загальний органічний вуглець, рН, каламутність). Дооснащення лабораторій сучасним обладнанням	Середньо-строковий (12-18 міс.)	38,594 - 57,891	Потреба: Розробка проєкту системи моніторингу. Вартість: ~7% від капітальних інвестицій	ДБ (Програма покращення питного водопостачання України), МТД, МБ	КП «Дніпроводок анал» (Лабораторія, Технічна служба)	Включити до міської системи моніторингу стану довкілля та раннього виявлення загроз.

		лабораторії	(хроматографи, спектрометри) для ідентифікації широкого спектру забруднювачів: пестицидів (лямбда-цигалотрин), важких металів (As, Cd, Pb), радіонуклідів (Sr-90, Cs-137), ціанотоксинів (мікроцистин-LR) та бойових отруйних речовин. Обґрунтування: Забезпечує раннє виявлення різкого погіршення якості води, дозволяючи своєчасно адаптувати технологію очищення або зупинити водозабір, запобігаючи масовим отруєнням. ЦСР 6.1: Забезпечення безпеки питної води.			(2,702 – 4,149 тис. грн.)			
4	Хімічна та біологічна безпека (ЦСР 6.1, 6.3, 11.5)	1.4. Впровадження додаткових бар'єрів очищення (УФ-знезараження)	Встановлення установок УФ-знезараження на виході з ВОС як додаткового бар'єру проти стійких до хлору патогенів (Cryptosporidium) та вірусів. Обґрунтування: Підвищує гарантії епідемічної безпеки,	Довгостроковий (24-36 міс.)	72,364 - 106,134	- Потреба: ТЕО, розробка проєкту (П/ППР). Вартість: ~8% від капітальних інвестицій (5,789 – 8,491 тис. грн.)	Кредити МФО, ДП (Програма покращення питного водопостачання України)	КП «Дніпроводоканал», Підрядні організації	Передбачити як етап модернізації очисних споруд з метою переходу на європейські стандарти якості питної води.

			особливо в умовах, коли ефективність хлорування може бути знижена через високу каламутність води. ЦСР 6.1, 6.3: Покращення якості води.						
5	Хімічна та біологічна безпека (ЦСР 6.1, 6.3, 11.5)	1.5. Створення запасу спеціальних реагентів та розробка протоколів	Формування на захищених складах незнижуваного запасу порошкоподібного активованого вугілля, перманганату калію для боротьби зі специфічними забрудненнями. Розробка покрокових інструкцій для технологів на випадок виявлення різних класів забруднень. Обґрунтування: Забезпечує готовність до реагування на нетипові хімічні забруднення, мінімізуючи наслідки.	Постійний	Потребує ТЕО	Потреба: Розробка регламентів. Вартість: включена в операційні витрати.	КП	Служба МТЗ, Технологи	Передбачити у системі цивільного захисту та планах дій у надзвичайних ситуаціях.
6	Хімічна та біологічна безпека (ЦСР 6.1, 6.3, 11.5)	1.6. Створення комплексної системи контролю промислового	Створення міжвідомчої програми контролю та системи раннього оповіщення, сфокусованої на об'єктах підвищеної небезпеки: хвостосховищах ПХЗ,	Довгостроковий (24-36 міс.)	Потребує ТЕО	Потреба: Розробка міжвідомчої програми, ТЕО системи моніторингу. Вартість: ~10%	ДБ (Розвиток інфраструктури поведження з радіоактивними	Дніпровська міська рада, Військово-цивільна адміністрація, Державна екологічна	Включити як ключовий елемент регіональної програми екологічної безпеки та

		забруднення у верхів'ї р. Дніпро	металургійних та коксохімічних заводах у м. Кам'янське, ГЗК у м. Горішні Плавні. Обґрунтування: Превентивний захід, спрямований на зниження високого ризику, пов'язаного з потраплянням у р. Дніпро радіонуклідів та важких металів.			від вартості проєкту	відходами), МБ, МТД	інспекція, КП «Дніпроводоканал»	захисту басейну р. Дніпро.
7	Енергетична незалежність та ефективність (ЦСР 7.3, 9.1)	2.1. Забезпечення автономного живлення високовольтних насосів НС I-го підйому	Ключовий захід стійкості. Встановлення паралельно існуючим високовольтним насосам (6/10 кВ) нових низьковольтних «насосів блекауту» (0,4 кВ) для роботи від наявних генераторів. Альтернатива – закупівля високовольтних ДЕС або ДЕС з підвищувальними трансформаторами. Обґрунтування: Усуває критичну вразливість водозаборів до блекаутів, оскільки наявні низьковольтні генератори не можуть живити основні насоси. Забезпечує подачу 25-30% води, що дозволяє уникнути повної зупинки	Середньо-строковий (12-18 міс.)	86,837 120,607	- Потреба: Розробка проєкту модернізації НС. Вартість: ~7% від капітальних інвестицій (6,079 – 8,442 тис. грн.)	МТД, МБ, ДБ (Програма енергетичної модернізації підприємств водопостачання та водовідведення)	КП «Дніпроводоканал» (Служба головного енергетика/механіка), Підрядні організації	Включити до блоку «Енергетична стійкість систем водопостачання» як першочерговий захід.

			станції. ЦСР 7.3: Енергоефективність.						
8	Енергетична незалежність та ефективність (ЦСР 7.3, 9.1)	2.2. Диференційоване забезпечення ВНС, ПНС та КНС автономним живленням	Абсолютний пріоритет для КНС. Застосування диференційованого підходу до забезпечення автономності насосних станцій: - Для критично важливих КНС та ВНС: стаціонарні дизель-генератори з АВР та запасом палива на 7 діб; - Для підвищувальних насосних станцій (ПНС): замість неефективного встановлення генератора на кожній ПНС, впровадити системи накопичення енергії (СНЕ) для короткочасних перебоїв та забезпечити роботу мобільних бригад з генераторами для тривалих відключень. Обґрунтування: Забезпечення 100% КНС автономним живленням є абсолютним пріоритетом для уникнення санітарної катастрофи, дозволить	Середньо-строковий (12-24 міс.)	144,728 217,093	- Потреба: Розробка типових проєктів підключення. Вартість: ~5% від капітальних інвестицій (7,236 – 12,061 тис. грн.)	МТД, МБ, ДБ (Програма енергетичної модернізації підприємств водопостачання та водовідведення)	КП «Дніпроводоканал, Підрядні організації	Включити як обов'язковий елемент модернізації інженерної інфраструктури та цивільного захисту.

			уникнути ризиків для персоналу під час пересування містом під обстрілами. ЦСР 6.2: Належні санітарні умови.						
9	Енергетична незалежність та ефективність (ЦСР 7.3, 9.1)	2.3. Комплексний енергоаудит та модернізація насосного парку	Проведення енергоаудиту всіх НС та заміна застарілих насосних агрегатів в комплекті на енергоефективні моделі з частотними перетворювачами. Обґрунтування: Забезпечує сумісність з генераторами та знижує споживання електроенергії на 20-40%, що зменшує навантаження на мережу та потребу в потужних генераторах. ЦСР 7.3: Енергоефективність.	Постійний (програма на 5 років)	~241,214 (на 5 років)	Потреба: Енергоаудит, ТЕО для кожного об'єкту. Вартість: Включена в загальну суму.	КП (тариф, амортизація, Кредити МФО, ДБ (Програма енергетичної модернізації підприємств водопостачання та водовідведення)	КП «Дніпроводок аналіз, Залучені енергоаудитори	Передбачити як довгострокову програму підвищення енергоефективності комунального сектору.
10	Енергетична незалежність та ефективність (ЦСР 7.3, 9.1)	2.4. Створення локальної розподіленої енергетичної мережі	Перспективний захід. Розробка ТЕО для будівництва сонячних електростанцій та систем накопичення енергії (батарей) на ключових об'єктах (ВОС, КОС). Розгляд можливості встановлення	Довгостроковий (5+ років)	Потребує ТЕО	Розробка ТЕО, залучення грантових коштів та міжнародних інвестицій.	МТД, МФО	КП «Дніпроводок аналіз», Міська рада, Залучені консультанти	Включити як стратегічний напрямок розвитку енергетичної незалежності міста.

			когенераційних установок. Мета – об'єднати ці об'єкти в єдину локальну мережу для забезпечення енергетичної стійкості критичних вузлів водоканалу та, можливо, міста.						
11	Операційна гнучкість, керованість та захист (ЦСР 9.1, 11.5)	3.1. Завершення створення ГІС та гідравлічної моделі (ГМ), розробка Схеми оптимізації	Фундаментальний захід, що складається з двох етапів: - Етап 1: Завершення інвентаризації та паспортизації всіх активів (мереж, споруд). На основі цих даних створення сучасної ГІС та калібрування повноцінної гідравлічної моделі. Розробка на основі ГМ протоколів реагування на кризові сценарії (втрата джерела, забруднення, пошкодження мереж). - Етап 2: Розробка Схеми оптимізації. На базі створеної ГМ розробляється, погоджується та затверджується Схеми	Невідкладний (до кінця 2025)	~7,236 (завершення)	Фінансується в рамках поточного проєкту GIZ.	МТД (GIZ), ДБ (Програма розвитку муніципальної інфраструктури України, Програма енергетичної модернізації підприємств водопостачання та водовідведення)	Консорціум «ІТ ОТГ», КП «Дніпроводоканал» (ВТБ)	Ув'язати з Генпланом як основу для цифрової трансформації управління міською інфраструктурою.

			оптимізації відповідно до Порядку, затвердженого Наказом Мінінфраструктури. Обґрунтування: ГМ дозволяє заздалегідь прорахувати та затвердити оптимальні алгоритми дій, мінімізуючи наслідки аварій. Схема оптимізації є офіційним документом для обґрунтування інвестицій та залучення фінансування для модернізації. ЦСР 9.1: Надійна інфраструктура.						
12	Операційна гнучкість, керованість та захист (ЦСР 9.1, 11.5)	3.2. Багаторівневий комплексний фізичний захист об'єктів	Облаштування багаторівневого захисту навколо критичних вузлів (НС I-підйому, хлорні господарства, генератори, РЧВ, «вузькі місця» на ВОС/КОС): - Рівень 1 (пасивний інженерний захист): облаштування захисних периметрів з використанням габіонів, бетонних блоків або швидкозбірних захисних споруд типу HESCO	Невідкладний (6-12 міс.)	48,24372,364	- Потреба: Розробка типових проєктних рішень. Вартість: ~5% від капітальних інвестицій (2,412 – 3,618 тис. грн.)	МБ, ДБ (Фонд ліквідації наслідків агресії, Надзвичайна кредитна програма для відновлення України)	КП «Дніпроводок анал», Військово-цивільна адміністрація, Підрядні організації	Включити як обов'язкові об'єкти критичної інфраструктури із захисними спорудами згідно з ДБН.

			bastion. Мета – захист від уламків та вибухової хвилі. - Рівень 2 (активний захист): встановлення горизонтальних та/або вертикальних протидронових сіток для передчасної детонації бойової частини дронів та ракет на безпечній відстані від об'єкта. - Рівень 3 (спеціалізований захист): у співпраці з військовою адміністрацією, інтеграція ключових об'єктів до загальноміської системи захисту, що може включати системи РЕБ та ППО. Обґрунтування: Пряме зниження вразливості до кінетичних загроз.						
13	Операційна гнучкість, керованість та захист (ЦСР 9.1, 11.5)	3.3. Будівництво/модернізація захисних споруд та	Будівництво/реконструкція укриттів/бомбосховищ на ключових об'єктах для забезпечення тривалого (до 3 діб) автономного перебування чергової	Середньо-строковий (12-24 міс.)	28,946 43,419	- Потреба: Проектування (стадії П/ППР). Вартість: ~10% від капітальних інвестицій	МБ, КП, ДБ (Фонд ліквідації наслідків агресії, Надзвичайна	КП «Дніпроводоканал» (Служба капітального будівництва),	Включити як обов'язковий елемент системи цивільного захисту на

		забезпечення автономності персоналу	зміни (включно з запасами їжі, води, медикаментів). Забезпечення підприємства броньованим транспортом для доставки персоналу. Обґрунтування: Мінімізує ризик зупинки об'єкта через неможливість безпечного доступу або перебування персоналу. ЦСР 11.5: Захист персоналу.			(28,946 - 43,419 тис. грн.)	кредитна програма для відновлення України)	Підрядні організації	об'єктах критичної інфраструктури .
14	Операційна гнучкість, керованість та захист (ЦСР 9.1, 11.5)	3.4. Комплексні заходи з кібербезпеки	Фізична ізоляція технологічної мережі SCADA від IT-мережі та Інтернету. Впровадження Firewall промислового класу, двофакторної автентифікації. Налаштування надійного резервного копіювання за принципом «3-2-1»". Регулярний аудит безпеки та навчання персоналу. Обґрунтування: Запобігає несанкціонованому втручанню в технологічні процеси, що може мати	Постійний	Потребує ТЕО	Потреба: Аудит, розробка політик. Вартість: залежить від обсягу.	КП, МБ	ІТ-відділ, Служба безпеки	Включити до Генплану як фундаментальний захід кіберзахисту критичної інфраструктури .

			наслідки, аналогічні фізичному руйнуванню.						
15	Матеріально-технічне забезпечення та зниження втрат (ЦСР 6.4, 12.5)	4.1. Програма зниження втрат води	Комплексна програма: створення зон комерційного обліку (DMA), закупівля обладнання для пошуку витоків, пріоритетна заміна аварійних мереж (не менше 2% на рік). Обґрунтування: Втрати 40% - критичний показник, зниження якого зменшує навантаження на джерела та очисні споруди. ЦСР 6.4: Ефективність водокористування.	Постійний (програма на 5 років)	482,428 - 723,642 (на 5 років)	Потреба: ТЕО, щорічне проектування. Вартість: ~7% від капітальних інвестицій (33,770 – 50,655 тис. грн.)	Кредити МФО, КП (інвестпрограма), ДБ (Програма покращення питного водопостачання України)	КП «Дніпроводоканал» (Служба експлуатації мереж), Проектні інститути, Підрядні організації	Передбачити як довгострокову міську програму модернізації та підвищення ефективності мереж водопостачання.
16	Матеріально-технічне забезпечення та зниження втрат (ЦСР 6.4, 12.5)	4.2. Створення розосереджених стратегічних запасів	Створення 3-4 менших, географічно рознесених та захищених (підземних або обвалованих) сховищ для незнижуваного аварійного запасу труб, засувки, муфти, кабелів. Формування стратегічного запасу палива (на 10 - 14+ діб), реагентів (на 30-45 діб) та уніфікованих запчастин. Обґрунтування: Знижує	Середньостроковий (12-18 міс.)	24,121 - 36,182 (без вартості матеріалів)	Потреба: Розробка проекту організації складського господарства. Вартість: ~5% від капітальних інвестицій (1,206 – 1,833 тис. грн.)	КП, МБ	КП «Дніпроводоканал» (Служба МТЗ)	Включити як елемент логістичної стійкості та матеріального резерву міста.

			ризик втрати всього запасу при одному ударі, забезпечує можливість реагування на будь-які аварії, навіть в умовах повної паливної кризи, та прискорює логістику. Додатково, для забезпечення роботи генераторів, є необхідність передбачення: - Укладання договорів з мережами АЗК на тимчасове зберігання вже викупленого палива або використання талонів, щоб уникнути створення власного акцизного складу. - Формування запасу витратних матеріалів: оливи/мастила, фільтрів, антифризу та протиморозних присадок.						
17	Матеріально-технічне забезпечення та зниження	4.3. Превентив на діагностика, санація та	Впровадження проактивного підходу: регулярна телеінспекція магістральних колекторів та застосування	Постійний (програма на 5 років)	~144,728 (на 5 років)	Потреба: Розробка щорічних планів санації. Вартість:	Кредити МФО, МБ, КП, ДБ (Програма технічної	КП «Дніпроводок анал», Підрядні організації	Передбачити як довгострокову міську програму забезпечення

	втрат (ЦСР 6.4, 12.5)	розробка планів байпасування колекторів	безтраншейних методів санації (релайнінгу). Розробка інженерних планів для організації тимчасових обвідних ліній (байпасів) навколо критичних ділянок. Обґрунтування: Ремонт зруйнованого колектора є надзвичайно тривалим та складним. Готові плани та запаси матеріалів для байпасування є ключовими для мінімізації наслідків. Значно дешевше, ніж ліквідація наслідків руйнування. ЦСР 6.2, 11.5: Надійність санітарії.			Включена в загальну суму.	модернізації підприємств водовідведення та очищення стічних вод)		надійності системи водовідведення .
18	Операційна гнучкість, керуваність та захист (ЦСР 9.1, 11.5)	5.1.Розвиток альтернативних джерел та децентралізованого запасу води	Провести ревізію та ремонт 128 водорозбірних колонок. Розробити план буріння нових артезійських свердловин у ключових районах. Створити програму встановлення стаціонарних ємностей (50-100 м³) біля лікарень, хлібозаводів та в інших критичних точках. Обґрунтування: Забезпечує мінімальний рівень водопостачання населення	Середньо-строковий (12-24 міс.)	Потребує ТЕО	Потреба: Розробка програми, проєктування. Вартість: ~10% від капітальних інвестицій	МБ, МТД, ДБ (Програма покращення питного водопостачання України)	Служба капітального будівництва, Служба експлуатації мереж	Передбачити у Генплані розвиток резервних джерел як об'єктів безперебійного забезпечення населення водою.

			у випадку повного колапсу централізованої системи.						
19	Операційна гнучкість, керованість та захист (ЦСР 9.1, 11.5)	5.2. Проєктування нових НС за принципом «захищеної інфраструктури»	При необхідності будівництва нових насосних станцій (ВНС, КНС) або їх кардинальної реконструкції, проєктувати їх таким чином, щоб основні технологічні приміщення (машинні зали) були заглиблені на 4-6 метрів під землю. Обґрунтування: Це забезпечує значно вищий рівень захисту від прямих влучань та уламків.	Перспективний (при новому будівництві)	Потребує ТЕО	Вартість проєктування включається у вартість нового об'єкта.	Кредити МФО, ДБ, МБ, ДБ (Відновлення інфраструктури і централізованого водопостачання та водовідведення України)	КП «Дніпроводоканал», Проектні організації	Включити як обов'язкову вимогу до ДБН для об'єктів критичної інфраструктури в умовах воєнного стану.
20	Операційна гнучкість, керованість та захист (ЦСР 9.1, 11.5)	5.3. Модернізація водозаборів для роботи при низьких рівнях води	Проведення інженерної оцінки та розроблення проєктів модернізації існуючих водозаборів (поглиблення водоприймальних ковшів, колодязів). Розгляд можливості закупівлі мобільних плавучих насосних станцій. Обґрунтування: Запобігає одночасній зупинці обох основних водозаборів міста через оголення водоприймачів внаслідок	Довгостроковий (24-36 міс.)	Потребує ТЕО	Потреба: Проектні рішення, технічні висновки інженерної оцінки.	ДБ, МФО, МТД	Служба капітального будівництва, технічна служба КП «Дніпроводоканал»	Передбачити у Генплані як стратегічний інфраструктурний проєкт адаптації до кліматичних змін та воєнних загроз.

			падіння рівня води в р. Дніпро.						
21	Операційна гнучкість, керованість та захист (ЦСР 9.1, 11.5)	5.4. Створення парку мобільних насосних станцій (ПНС та КНС)	Формування запасу мобільних насосних установок на базі причепів (для ПНС) та потужних мобільних насосів для перекачки стоків (для КНС). Обґрунтування: Дозволяє оперативно підключити мобільну установку до мережі для тимчасового відновлення водопостачання або водовідведення на час ремонту зруйнованої стаціонарної станції, скорочуючи час відсутності послуги з тижнів до 1-2 діб.	Середньо-строковий (12-18 міс.)	Потребує ТЕО	Потреба: Розрахунок необхідної кількості та потужності, розробка типових проєктів підключення.	МТД, МБ, ДБ (Надзвичайна кредитна програма для відновлення України)	Технічна служба, служба водовідведення КП «Дніпроводоканал»	Включити як елемент мобільного резерву для кризових сценаріїв, що забезпечує гнучкість системи.
22	Операційна гнучкість, керованість та захист (ЦСР 9.1, 11.5)	5.5. Захист КОС від аварійних промислових скидів	Встановлення автоматичних станцій контролю якості на вході КОС для раннього виявлення токсичних стоків. Облаштування на вході КОС усереднювачів або аварійних резервуарів для оперативного перенаправлення «хвилі»	Довгостроковий (24-36 міс.)	Потребує ТЕО	Потреба: Проєктні документи, технічні акти, рекомендації технологічної ради.	МБ, МФО, кошти підприємств-забруднювачів, ДБ (Програма технічної модернізації підприємств водовідведення)	Служба експлуатації КОС, технологи КП «Дніпроводоканал»	Включити до Генерального плану як превентивний захід щодо аварійних ситуацій на КОС та захисту екосистеми р. Дніпро.

			забруднення. Обґрунтування: Запобігає загибелі активного мулу, що є «серцем» біологічної очистки, та унеможлиблює довготривалу екологічну катастрофу.				я та очищення стічних вод)		
--	--	--	--	--	--	--	-------------------------------	--	--

1. Реалізація заходів потребує тісної координації між КП «Дніпроводоканал», Дніпровською міською радою, військово-цивільною адміністрацією та міжнародними партнерами. Порядок реалізації має уточнюватися щорічно на основі наявних фінансових ресурсів, при цьому заходи з пріоритетом «Найвищий» та/або «Невідкладний» мають бути виконані в першу чергу.

2. Згідно з відкритими даними, обслуговування зливової каналізації в місті Дніпро переважно входить до компетенції окремого комунального підприємства «Гідропоруди», а не КП «Дніпроводоканал». Таким чином, заходи щодо запобігання затопленням, пов'язаним зі зливами, повинні бути інтегровані в стратегію розвитку відповідного профільного підприємства та загальноміські плани адаптації до змін клімату.

3. Встановлення систем РЕБ (радіоелектронної боротьби) та ППО (протиповітряної оборони) є виключною компетенцією Збройних Сил України та військової адміністрації. Хоча цей захід є критично важливим для захисту інфраструктури, він реалізується у співпраці з військовими, а не за рахунок водоканалу, і тому внесений до таблиці як спільний захід.