

АНОТАЦІЯ

Сахновська В.М. Теоретичне обґрунтування планування заходів забезпечення екологічної безпеки муніципальних систем водовідведення. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 101 «Екологія» – Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ, 2025.

Дисертаційне дослідження присвячено розробленню методичних та прикладних положень комплексного оцінювання та моніторингу впливу на довкілля муніципальних систем водовідведення для забезпечення їхньої екологічної безпеки. В роботі поставлено основні завдання, мету і завдання дослідження, предмет та об'єкт, на які спрямовано вирішення проблеми.

У роботі проаналізовано сучасний екологічний стан муніципальних систем водовідведення в Україні, досліджено теоретичні та методологічні підходи до забезпечення їхньої екологічної безпеки, а також екологічну значущість та існуючі методи визначення ексфільтрації та інфільтрації.

Аналіз літературних джерел показав, що загальний обсяг збитків зруйнованої та пошкодженої інфраструктури водопостачання та водовідведення станом на початок 2024 року сягав 3,318 мільярдів доларів США. Згідно з даними за 2023 рік, основна частка забруднених стічних вод, припадала на сектор "Водопостачання, каналізація, поводження з відходами", що визначає його як основне джерело антропогенного навантаження на водні ресурси країни. Наявність розгалуженої нормативно-правової бази в Україні у галузі водовідведення, не гарантує її ефективності без належного застосування та контролю за дотриманням встановлених екологічних норм.

Незважаючи на значний обсяг досліджень та актуальність питань, пов'язаних з екологічною безпекою систем водовідведення та надійністю їх окремих компонентів, комплексна оцінка екологічної безпеки муніципальних систем водовідведення залишається недостатньо висвітленою в науковій літературі. Особливої уваги потребує інтеграція та взаємодія між системами водопостачання та водовідведення, що мають суттєвий вплив на екологічну безпеку навколишнього середовища.

Для вирішення цього завдання запропоновано та теоретично-обґрунтовано концепцію оцінювання екологічної безпеки муніципальних систем водовідведення, яка ґрунтується на системній моделі та враховує хімічні, біологічні та експлуатаційні фактори. Системна модель «Муніципальна система водовідведення» складається з трьох підсистем: «Експлуатація приймачів», «Мережі водовідведення», «Очисні споруди водовідведення». В свою чергу кожна підсистема складається з 3х блоків: експлуатаційного, біологічного та хімічного забруднення. Аналіз кожного блоку здійснюється відповідно до запропонованих критеріїв, на підставі чого кожен блок набуває бального значення «1» - екологічно безпечна система, «-1» - екологічно небезпечна система, «0» - умовно екологічно безпечна система. Загальний стан системи визначається за допомогою інтегрального показнику. При отриманні значень <1 розробляються комплекс заходів по інтенсифікації роботи системи в розрізі кожного окремого блоку до отримання значення «екологічно безпечна система».

Ця модель, завдяки своїй універсальності, легко адаптується до різних міських систем і може бути інтегрована в "розумні міста" для оперативного моніторингу. З розвитком штучного інтелекту в майбутньому, вона зможе автоматично аналізувати дані та прогнозувати тренди, мінімізуючи шкоду довкіллю та сприяючи сталому розвитку міст.

З метою забезпечення екологічної безпеки та сталого функціонування муніципальних систем водовідведення, особливо в умовах антропогенного навантаження, спричиненого воєнними діями, пропонується застосування методу експрес-моніторингу екологічної безпеки систем водовідведення.

Для диференційованого реагування на різні рівні ризику, системи водовідведення класифікуються на чотири категорії (I-IV). Це дозволяє розробити адаптивні стратегії, що базуються на результатах експрес-моніторингу, який використовує дев'ять ключових індикаторів для оперативного виявлення динаміки змін та загальний показник екологічного ризику. Запропоновано алгоритм визначення пріоритетності заходів з відновлення елементів системи водовідведення, який складається з чотирьох етапів. Алгоритм базується на визначенні коефіцієнта значущості. Планування відновлювальних робіт здійснюються відповідно до ієрархічного принципу, де об'єкти, що характеризуються високим коефіцієнтом значущості, мають найвищий рівень пріоритету.

Для еколого-економічного обґрунтування оптимізації роботи систем водовідведення в умовах експлуатації, запропоновано метод, який складається з 5-ти етапів: розрахунок вузла прийому стічних вод з урахуванням надійності роботи мережі та корегування норм водоспоживання; оцінка зміни якості води у колекторах; еколого-економічна оцінка остаточного вибору споруд та системи водовідведення; остаточне корегування систем водовідведення. Метод базується на інтеграції інженерно-екологічного аналізу з економічним моделюванням та застосуванні методу TOPSIS. Вибір системи водовідведення здійснюється на підставі 12 критеріїв з подальшим розрахунком еколого-інвестиційної привабливості.

Розроблено організаційні принципи підвищення екологічної безпеки муніципальних систем водовідведення України, які спиралися на проведений експрес-моніторинг MWWS під час триваючих військових дій.

Практично та теоретично обґрунтовано застосування запропонованого балансово-аналітичного методу для кількісної оцінки додаткового припливу та ексфільтрації як інструменту зменшення антропогенного навантаження на екосистеми, що дозволило розробити математичну модель для прогнозування обсягів водовідведення та визначити заходи з інтенсифікації роботи систем, спрямовані на підвищення їх екологічної безпеки. Розрахунки показали, що постійний додатковий приплив до системи водовідведення, населеного пункту, що досліджувався, коливається від 15 до 21%. При цьому постійний обсяг ексфільтрації може сягати 10% від загального обсягу стічних вод, що поступають на очисні споруди.

Ретроспективний аналіз екологічної безпеки систем водовідведення України за останнє десятиліття, проведений з використанням експрес-методу моніторингу, виявив критичний стан. У 2013 році 67% муніципальних систем водовідведення характеризувалися високим рівнем ризику екологічної небезпеки. До 2023 року спостерігалось погіршення ситуації в 9 областях, де зафіксовано суттєве зростання екологічного ризику. Лише одна область продемонструвала низький показник ризику.

Кількісна оцінка змін екологічного ризику показує, що в Донецькій області відповідний показник зріс на 48%, в Запорізькій - на 26%, Харківський – на 33%. Ці дані свідчать про значну деградацію стану систем водовідведення протягом 10 років війни та критичне погіршення екологічного стану урбанізованих територій впродовж останніх 10 років.

Хоча по Київській області в цілому стан систем водовідведення залишається стабільним (середній ризик), подальше проведення комплексної оцінки

муніципальної системи водовідведення малого населеного пункту на півдні області виявило її критичний екологічний стан. Основними факторами, що обумовили цей стан, є значний фізичний знос інфраструктури та несанкціоноване скидання 50 м³/добу неочищених стічних вод на 0,6 га рельєфу. Це призвело до значного забруднення ґрунтового покриву, загальні економічні збитки від якого оцінюються в 462,335 млн грн. Також зафіксовано перевищення гранично допустимих концентрацій шкідливих речовин в атмосферному повітрі.

Для вирішення даної екологічної проблеми було розглянуто дві альтернативні стратегії. Рекомендовано впровадження централізованої системи водовідведення з будівництвом нового напірного колектору. Еколого-економічний аналіз показав термін окупності даного варіанту у 1 рік 5 місяців. Запропоновано застосування комбінованого методу прокладання трубопроводів.

Крім того, розроблено комплекс першочергових та планових заходів з інтенсифікації роботи муніципальної системи водовідведення з метою досягнення екологічно безпечного стану системи.

Основний науковий результат, який виноситься на захист, полягає теоретичному обґрунтуванні планування заходів забезпечення екологічної безпеки муніципальних систем водовідведення.

Ключові слова: експрес-моніторинг, екологічний ризик, екологічна безпека, муніципальні системи водовідведення, комплексне оцінювання, балансово-аналітичний метод, інфільтрація.

ABSTRACT

Sakhnovska V.M. Theoretical Substantiation of Planning Measures to Ensure Environmental Safety of Municipal Wastewater Systems. – Qualification scientific work as a manuscript.

Thesis for obtaining the degree of Philosophy Doctor in the specialty 21.06.01 - environmental safety (101 - Ecology). - Kyiv National University of Construction and Architecture of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2023.

The dissertation research is dedicated to the development of methodological and applied principles for the comprehensive assessment and monitoring of the impact of municipal wastewater systems on the environment, with the aim of ensuring their ecological safety. The work outlines the main goals, objectives, research aim and tasks, subject matter, and object to which the problem's solution is directed.

The study analyzes the current ecological state of municipal wastewater systems in Ukraine, investigates theoretical and methodological approaches to ensuring their ecological safety, as well as the ecological significance and existing methods for determining exfiltration and infiltration.

The analysis of literature sources revealed that the total damage to destroyed and damaged water supply and wastewater infrastructure amounted to USD 3.318 billion as of the beginning of 2024. According to 2023 data, the main share of polluted wastewater came from the "Water supply; sewerage, waste management" sector, identifying it as the primary source of anthropogenic pressure on the country's water resources. The presence of an extensive regulatory and legal framework in Ukraine in the field of wastewater management does not guarantee its effectiveness without proper application and control over compliance with established environmental standards.

Despite a significant volume of research and the relevance of issues related to the ecological safety of wastewater systems and the reliability of their individual components, a comprehensive assessment of the ecological safety of municipal wastewater systems remains insufficiently addressed in the scientific literature. Particular attention needs to be paid to the integration and interaction between water supply and wastewater systems, which have a significant impact on the ecological safety of the environment.

To address this task, a concept for assessing the ecological safety of municipal wastewater systems is proposed and theoretically substantiated, based on a system model that considers chemical, biological, and operational factors. The "Municipal Wastewater System" system model consists of three subsystems: "Sewage receiver unit," "Wastewater networks," "Wastewater treatment plants". In turn, each subsystem consists of three blocks: operational, biological, and chemical pollution. The analysis of each block is carried out according to the proposed criteria, based on which each block acquires a score value: "1" - ecologically safe system, "-1" - ecologically unsafe system, "0" - conditionally ecologically safe system. The overall state of the system is determined using an integral indicator. If values <1 are obtained, a set of measures is developed to intensify the system's operation across each individual block until a value of "ecologically safe system" is achieved. This model, due to its universality, is easily adaptable to various urban systems and can be integrated into "smart cities" for operational monitoring. With the development of artificial intelligence in the future, it will be able to automatically analyze data and predict trends, minimizing environmental damage and promoting sustainable urban development.

To ensure the ecological safety and sustainable functioning of municipal wastewater systems, especially under anthropogenic pressure caused by military actions, the application of a rapid environmental safety monitoring method for wastewater systems is proposed.

For differentiated response to various risk levels, wastewater systems are classified into four categories (I-IV). This allows for the development of adaptive strategies based on the results of rapid monitoring, which uses nine key indicators for the operational detection of change dynamics and an overall ecological risk indicator. An algorithm for determining the priority of measures for the restoration of wastewater system elements, consisting of four stages, is proposed. The algorithm is based on determining a significance coefficient. Restoration work planning is carried out according

to a hierarchical principle, where objects characterized by a high significance coefficient have the highest level of priority.

For the ecological and economic substantiation of optimizing the operation of wastewater systems under operational conditions, a method consisting of five stages is proposed: calculation of the wastewater reception unit, considering network reliability and adjusting water consumption norms; assessment of changes in water quality in collectors; ecological and economic evaluation of the final selection of facilities and the wastewater system; final adjustment of wastewater systems. The method is based on the integration of engineering and ecological analysis with economic modeling and the application of the TOPSIS method. The selection of the wastewater system is carried out based on 12 criteria, followed by the calculation of ecological and investment attractiveness.

Organizational principles for improving the ecological safety of Ukraine's municipal wastewater systems have been developed, based on the rapid MWWS monitoring conducted during the ongoing hostilities.

The application of the proposed balance-analytical method for the quantitative assessment of additional inflow and exfiltration as a tool for reducing anthropogenic pressure on ecosystems has been practically and theoretically substantiated. This allowed for the development of a mathematical model for forecasting wastewater volumes and determining measures to intensify system operation aimed at improving their ecological safety. Calculations showed that the constant additional inflow to the wastewater system of the studied settlement ranges from 15 to 21%. At the same time, the constant volume of exfiltration can reach 10% of the total volume of wastewater entering the treatment facilities.

A retrospective analysis of the ecological safety of Ukraine's wastewater systems over the past decade, conducted using the rapid monitoring method, revealed a critical state. In 2013, 67% of municipal wastewater systems were characterized by a high level

of ecological risk. By 2023, the situation had worsened in 9 regions, where a significant increase in ecological risk was recorded. Only one region showed a low risk indicator.

The quantitative assessment of changes in ecological risk shows that in the Donetsk region, the corresponding indicator increased by 48%, in Zaporizhzhia - by 26%, and in Kharkiv - by 33%. These data indicate a significant degradation of the state of wastewater systems during the 10 years of war and a critical deterioration of the ecological state of urbanized areas over the past 10 years.

Although the overall state of wastewater systems in the Kyiv region remains stable (medium risk), further comprehensive assessment of the municipal wastewater system of a small settlement in the south of the region revealed its critical ecological state. The main factors contributing to this state are significant physical deterioration of infrastructure and unauthorized discharge of 50 m³/day of untreated wastewater onto 0.6 hectares of terrain. This has led to significant soil contamination, the total economic damage from which is estimated at UAH 462.335 million. Exceedances of maximum permissible concentrations of harmful substances in the atmospheric air were also recorded.

To address this ecological problem, two alternative strategies were considered. The implementation of a centralized wastewater system with the construction of a new pressure pipeline is recommended. An ecological and economic analysis showed a payback period for this option of 1 year and 5 months. The application of a combined method of pipeline laying is proposed.

In addition, a set of priority and planned measures has been developed to intensify the operation of the municipal wastewater system in order to achieve an ecologically safe state of the system.

The main scientific result submitted for defense lies in the theoretical substantiation of planning measures to ensure the ecological safety of municipal wastewater systems.

Keywords: express monitoring, environmental risk, environmental safety, municipal wastewater systems, comprehensive assessment, balance-analytical method, infiltration

Список публікацій здобувача:

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Сахновська В., Ткаченко Т. Забезпечення екологічної безпеки систем водовідведення під час бойових дій. *Екологічні науки* . 2024. № 5 (56). С. 105–109. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.5-56.15> (дата звернення: 12.03.2025). **(Фахове видання)**

Особистий внесок здобувача полягає у розробці алгоритму визначення пріоритетності заходів з відновлення елементів системи водовідведення, техніко-економічного обґрунтування варіантів забезпечення екологічної безпеки муніципальних систем водовідведення.

2. Planning of green roofs for the best thermotechnical effect / Т. Tkachenko et al. *Scientific Review Engineering and Environmental Sciences (SREES)*. 2025. Vol. 34, no. 1. P. 42–54. URL: <https://doi.org/10.22630/srees.9954> (дата звернення: 15.04.2025). **(SCOPUS, Q3)**

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі існуючих технологій зменшення навантаження на очисні споруди за рахунок ефективного управління поверхневим стоком при застосуванні зелених конструкцій (зелених покрівель, дощових зелених садів, зелених схилів тощо)

3. Т.М. Ткаченко, В.М. Сахновська. Експрес-метод моніторингу екологічної безпеки муніципальних систем водовідведення України під час військових дій. *Екологічна безпека та природокористування*, 53(1), 48-61. URL: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.1.48-61> (дата звернення: 19.04.2025) **(Фахове видання)**

Особистий внесок здобувача полягає у розробці методу проведення експрес-моніторингу екологічної безпеки та визначенні екологічних ризиків муніципальних систем водовідведення України під час військових дій.

4. Сахновська В. Концепція оцінки забезпечення екологічної безпеки муніципальних систем водовідведення // Moderní aspekty vědy: LV. Díl mezinárodní kolektivní monografie. Česká republika : Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o., 2025. С. 527-538 URL: <https://doi.org/10.52058/55-2025> (одноосібний розділ у колективній монографії)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. Ткаченко Т., Сахновська В. Забезпечення екологічної безпеки систем водовідведення під час військових дій. *Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Green Construction» («Зелене будівництво»):* Матеріали міжнар. конф., м. Київ, 16–17 квіт. 2024 р. Київ, 2024. С. 303–305. URL: https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/05/zbirnyk_gotovyyj-4.pdf (дата звернення: 15.04.2025).

Особистий внесок здобувача полягає у визначенні пріоритетності заходів з відновлення елементів системи водовідведення.

2. Михайловська Ю., Сахновська В. Надійність, як критерій екологічної безпеки мереж водопостачання та водовідведення. *Міжнародний форум «Безпечна, комфортна, спроможна, територіальна громада»:* Матеріали міжнар. конф., м. Дніпро, 11–13 жовт. 2023 р. Дніпро, 2023. С. 36–37. URL: <http://repositsc.nuczu.edu.ua/handle/123456789/19824> (дата звернення: 15.04.2025).

Особистий внесок здобувача полягає у визначенні залежності аварійності мереж водовідведення від аварійності мереж водопостачання.

3. Сахновська В. Екологічна безпека та стійкі системи водовідведення під час надзвичайних ситуацій в умовах воєнного стану. *Запобігання виникненню*

надзвичайних ситуацій, реагування та ліквідація їх наслідків: Матеріали круглого столу (вебінару)., м. Харків, 23 лют. 2023 р. Харків, 2023. С. 72–73.

4. Сахновська В. Розробка заходів забезпечення екологічної безпеки та надійності роботи систем водопостачання та водовідведення під час надзвичайних ситуацій та воєнних дій східних регіонів України. *Екологія. Ресурси. Енергія* : IV міжнар. науково-практ. конф., м. Київ, 22–24 листоп. 2023 р. Київ, 2023. С. 54–55. URL: https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2023/12/j_ere_2023.pdf. (дата звернення: 15.04.2025).

5. Сахновська В., Михайловський О. Забезпечення техногенної та екологічної безпеки об'єктів критичної інфраструктури під час військових дій на прикладі систем водопостачання та водовідведення. *Енергоощадні машини і технології*: Матеріали V Міжнар. науково-практ. конф., м. Київ, 22–24 трав. 2024 р. Київ, 2024. С. 199–201.

Особистий внесок здобувача полягає у розробці механізму прийняття рішень щодо відновлення об'єктів критичної інфраструктури

6. Сахновська В. Системна модель забезпечення екологічної безпеки муніципальних систем водопостачання та водовідведення під час воєнного стану. *Енергія. Ресурси. Екологія багатofункціональні еко - та енергоефективні, ресурсозберігаючі технології в архітектурі, будівництві та суміжних галузях*: V-та міжнар. науково-практ. конф., м. Київ, 27–29 листоп. 2024 р. Київ, 2024. С. 100–102. URL: <https://www.knuba.edu.ua/wp-content/uploads/2024/12/ere-2024-ua.pdf> (дата звернення: 15.04.2025).

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

Статті у журналах:

1. Сучасні технології реновації водопровідних мереж / Н. Насонкіна та ін. *Водопостачання та водовідведення*. 2008. № 5. С. 16–22.

Особистий внесок здобувача полягає у аналізі сучасних методів відновлення трубопроводів.

2. Nasonkina N., Sakhnovskaya V. Complex evaluation of water supply and sewerage systems. *Інженерні системи та техногенна безпека*. 2009. No. 2009-2(76). P. 158–166.

Особистий внесок здобувача полягає у розробці системної моделі оцінки екологічної безпеки муніципальних систем водовідведення України

3. Nasonkina N., Sakhnovskaya V. System analysis of evaluation of ecological safety of Water supply and water disposal. *Industrial and civil construction*. 2009. Vol. 5, no. 3. P. 113–123.

Особистий внесок здобувача полягає концептуалізації та розробці інтегративної системної моделі, призначеної для кількісної оцінки екологічних ризиків, пов'язаних з функціонуванням муніципальних систем водовідведення в Україні, та їх впливу на екологічну безпеку довкілля.

4. Стратегія проведення моніторингу й реформування систем муніципального водопостачання / Н. Насонкіна та ін. *Водопостачання та водовідведення* 2009. Т. 2. С. 2–8.

Особистий внесок здобувача полягає у розробці п.1 моніторингу систем муніципального водопостачання.

5. Сахновська В. Визначення базових та додаткових факторів, що впливають на надійність та екологічну безпеку мереж водопостачання і водовідведення. *Nauchno-tekhnycheskyi sbornyk "Kommunalnoe khoziaistvo horodov"*. 2009. № 2. С. 376–383. URL: <https://eprints.kname.edu.ua/17106/>.

6. Сахновська В. Аналіз стану та визначення заходів щодо покращення роботи водопровідної мережі міст Донецької області. *Вісник ДонНАБА*. 2010. Т. 3, № 83. С. 276–284.

7. Сахновська В. Моніторинг стану водопровідної мережі міст Донецької області. *Містобудування та територіальне планування: наук.-техн. збірник*. 2009. № 32. С. 385–394.

8. Насонкіна Н., Сахновська В., Пашков В. Аналіз стану та критерії безпеки мереж водовідведення. *Містобудування та територіальне планування: наук.-техн. збірник*. 2010. № 37. С. 349–358.

Особистий внесок здобувача полягає у визначенні значимості критеріїв, що впливають на роботу мереж водопостачання та водовідведення, побудові графів зв'язності та матриці домінування.