

РЕЦЕНЗІЯ

**на кваліфікаційну наукову працю Потапенко Світлани Павлівни на
тему: «Підвищення стійкості систем питного водопостачання та
водовідведення»,**

яку подано на здобуття наукового ступеня доктора філософії
в галузі знань 19 – Архітектура та будівництво
за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія

Актуальність теми дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Потапенко Світлани Павлівни присвячена розв'язанню актуального науково-практичного завдання – підвищенню стійкості систем питного водопостачання та водовідведення в умовах воєнних, техногенних, екологічних, енергетичних та інших кризових впливів. Як складні технічні системи критичної інфраструктури, вони мають забезпечувати не лише безвідмовність окремих елементів, а й збереження основних функцій, локалізацію аварій, обмеження наслідків каскадних відмов та відновлення працездатності у прийнятні строки. У цьому контексті проблема дослідження безпосередньо пов'язана із забезпеченням надійності, життєстійкості, безпеки та зниженням вразливості й ризиків функціонування систем.

Важливим науковим здобутком є запропонований авторкою перехід від переважно реактивного реагування на аварійні ситуації до превентивного ризик-орієнтованого управління, що передбачає ідентифікацію загроз, оцінювання вразливості, сценарний аналіз, порівняння альтернатив та формування адаптивних інженерних рішень. Комплексне врахування гідравлічних, технологічних, енергетичних, безпекових, геоінформаційних та економічних чинників забезпечує системність запропонованого підходу. Отже, актуальність теми дисертаційної роботи є належно обґрунтованою, а її спрямованість відповідає сучасним потребам науки, галузі та практики управління критичною інфраструктурою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами

Дисертаційну роботу виконано відповідно до державних програм «Розробка науково-методичних рекомендацій із забезпечення належної якості очищення стічних вод і захисту водних ресурсів. Прикладні дослідження і розробки» та «Забезпечення споживачів якісною питною водою в умовах сучасних викликів. Прикладні дослідження і розробки», а також у зв'язку з держбюджетною тематикою Київського національного університету

будівництва і архітектури, що виконувалася на замовлення Міністерства освіти і науки України (номери державної реєстрації 0122U200351, 0122U200386). Зміст дисертації відповідає напрямам зазначених досліджень, а одержані результати мають безпосереднє значення для розвитку методів оцінювання ризиків, стійкості та безпеки функціонування систем питного водопостачання та водовідведення.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій

Мета роботи полягає у науковому обґрунтуванні та розробленні методів і моделей підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення шляхом упровадження уніфікованих алгоритмів оптимізації, управління ризиками та адаптивних технологічних рішень. Сформульовані завдання послідовно охоплюють аналіз сучасних загроз і вразливостей, формування системи індикаторних показників, логіко-математичну формалізацію задачі, розроблення інтегрального індексу стійкості $R(S)$, побудову матриці ризиків, сценарне та гідравлічне моделювання, систематизацію причинно-наслідкових зв'язків, обґрунтування адаптивних технічних рішень та визначення інвестиційних пріоритетів.

Об'єктом дослідження визначено процес функціонування та планування розвитку систем питного водопостачання та водовідведення під впливом кризових і деструктивних факторів, предметом – методологічні засади, математичні моделі та інженерно-технологічні рішення щодо підвищення їх стійкості через інструменти схем оптимізації. Для розв'язання поставлених завдань застосовано системний аналіз, декомпозицію й узагальнення, логіко-математичне та багатокритеріальне моделювання, ризик-орієнтоване планування, метод аналізу ієрархій Сааті, гідравлічне моделювання, геопросторовий аналіз, нормативно-аналітичні методи, стратегічне планування та бенчмаркінг. З позицій теорії надійності й управління ризиками методично важливим є поєднання оцінки стану системи з аналізом сценаріїв її деградації та відновлення.

Достовірність основних положень забезпечується комплексним використанням взаємодоповнювальних методів, аналізом значного масиву нормативних і наукових джерел, формалізацією критеріїв та обмежень, використанням логіко-графічного структурування причин небажаних подій, сценарним і гідравлічним моделюванням, техніко-економічним оцінюванням, а також практичною апробацією запропонованих підходів на матеріалах систем централізованого водопостачання та водовідведення міста Дніпра.

Висновки логічно впливають із результатів відповідних розділів і загалом відповідають меті та завданням дослідження.

Наукова новизна одержаних результатів

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає у формуванні комплексної методології оцінювання та підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення, орієнтованої на функціонування критичної інфраструктури в умовах множинних загроз. З позиції ризик-орієнтованого управління найбільш вагомими є результати, що забезпечують перехід від описової характеристики небезпек до їх структурованого аналізу, ранжування та врахування під час вибору технічних і управлінських рішень. До найбільш вагомих результатів слід віднести:

1. розроблення логіко-математичної моделі та інтегрального індексу стійкості $R(S)$, який дає змогу кількісно порівнювати базовий і альтернативні сценарії розвитку системи з урахуванням її здатності зберігати критичні функції, адаптуватися до деструктивних впливів і відновлюватися;

2. формування комплексної ієрархічної системи індикаторів, що охоплює технічний стан, ресурсозбереження, енергоефективність, технологічну захищеність, екологічну безпеку, вразливість та готовність до надзвичайних ситуацій;

3. обґрунтування оновленого підходу до схем оптимізації систем централізованого водопостачання та водовідведення як до ітераційного інструменту стратегічного управління, що поєднує інформаційно-аналітичний блок, ідентифікацію ризиків, варіантне моделювання, оптимізацію та планування реалізації;

4. формування трифакторної матриці ризиків та багатокритеріальної процедури ранжування загроз, що створює основу для переходу від переліку небезпечних факторів до обґрунтованої пріоритизації превентивних заходів;

5. розроблення шестивекторної діаграми Ісікави для систематизації технічних, фінансово-економічних, нормативно-правових, соціальних, зовнішніх та управлінських чинників зниження стійкості, що дає змогу структуровано простежувати причинно-наслідкові зв'язки виникнення та розвитку небажаних подій;

6. розвиток практичного інструментарію ризик-орієнтованого планування, зокрема алгоритмів сценарного моделювання, гідравлічної та геопросторової верифікації, техніко-економічного оцінювання і формування адаптивних пакетів заходів для різних сценаріїв порушення функціонування систем.

Сукупність зазначених результатів має системний характер. Важливим є те, що авторка пов'язує поняття стійкості з ризиком, вразливістю, надійністю та безпекою, а запропонований інструментарій орієнтує процес прийняття рішень на завчасне виявлення критичних чинників і зниження ймовірності або тяжкості наслідків небажаних подій. Це розвиває методичну базу управління складними водогосподарськими системами в умовах невизначеності та множинних загроз.

Практичне значення результатів дослідження

Практичне значення роботи полягає у можливості безпосереднього застосування запропонованих моделей та алгоритмів органами місцевого самоврядування, підприємствами питного водопостачання та водовідведення, проєктними організаціями й органами виконавчої влади під час розроблення схем оптимізації, планів стійкості, програм відновлення, планів реагування на надзвичайні ситуації та інвестиційних проєктів. Запропонована система індикаторів і матриця ризиків можуть використовуватися для технологічного аудиту, раннього виявлення критичних відхилень та обґрунтування пріоритетності превентивних заходів.

Результати дослідження використано при розробленні Стратегії підвищення стійкості систем централізованого водопостачання та водовідведення міста Дніпра на період до 2030 року та плану її реалізації. Запропоновані рішення охоплюють цифрове гідравлічне моделювання, резервування енергопостачання, використання енергоефективних насосів для роботи в умовах блекауту, поетапну відмову від небезпечного газоподібного хлору, застосування мобільних і локальних установок очищення води, сорбційних бар'єрів та альтернативних схем забезпечення споживачів. Наявні лист підтримки й акт практичного використання результатів КП «Дніпроводоканал» підтверджують прикладну спрямованість дослідження.

Окремо слід позитивно відзначити включення до роботи інструментів оцінки вартості життєвого циклу, адаптованих показників NPV_{res} і BCR_{res} , матриці диверсифікації джерел фінансування та стрес-тестування інвестиційних пакетів. У поєднанні з ризик-орієнтованою пріоритизацією це дозволяє спрямовувати ресурси насамперед на заходи, що знижують найбільш критичні ризики та підвищують здатність системи протидіяти аварійним і кризовим впливам.

Оцінка змісту та завершеності дисертаційної роботи

Дисертація складається з анотації, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг становить

226 сторінок, з яких 148 сторінок основного тексту. Список використаних джерел містить 197 найменувань. Робота включає 32 формули, 26 таблиць, 19 рисунків та три додатки. Структура дисертації є послідовною: від аналізу сучасних підходів до надійності, стійкості та ризиків – до формування методології, математичного моделювання, верифікації рішень та їх техніко-економічного обґрунтування.

У першому розділі

проаналізовано сучасний стан та основні проблеми забезпечення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення, узагальнено вітчизняний і міжнародний досвід їх функціонування та управління в умовах кризових і деструктивних впливів. Розглянуто наукові підходи до забезпечення надійності, безпеки, стійкості, оцінювання вразливості та управління ризиками, а також нормативні й інвестиційні аспекти розвитку систем.

За результатами аналізу обґрунтовано необхідність переходу від традиційного планування до ризик-орієнтованого сценарного підходу, що враховує можливість каскадних відмов, порушення енергопостачання, пошкодження мереж і споруд, дефіциту реагентів та забруднення джерел водопостачання. Такий підхід дає змогу комплексно оцінювати потенційні загрози, їх взаємозв'язки та можливі наслідки для функціонування систем, що створює основу для визначення пріоритетних заходів щодо запобігання аварійним ситуаціям, мінімізації їх наслідків та підвищення стійкості систем водопостачання та водовідведення.

У другому розділі

наведено характеристику та концептуальні засади підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення. Авторкою систематизовано основні технологічні рішення для об'єктів водопостачання і водовідведення, розглянуто централізовані, децентралізовані та мобільні підходи до забезпечення їх функціонування в умовах кризових впливів. Сформовано авторську концептуальну модель розроблення схем оптимізації, орієнтовану на врахування ризиків, оцінювання альтернативних рішень та підвищення стійкості систем.

Важливим результатом є представлення процесу як п'яти взаємопов'язаних етапів – від формування інформаційної бази та аналізу ризиків до цифрового моделювання, оцінювання альтернатив і стратегічного планування. Така послідовність забезпечує комплексний підхід до прийняття рішень та відповідає логіці управління ризиками – від ідентифікації небезпек

і оцінювання їх впливу до вибору відповідних заходів та контролю отриманих результатів. Запропоновані підходи створюють методичне підґрунтя для подальшої кількісної оцінки стійкості та розроблення практичних заходів щодо її підвищення.

У третьому розділі

розроблено системні підходи до формування схем оптимізації систем питного водопостачання та водовідведення. Запропоновано ієрархічну систему показників поточного стану та розвитку, логіко-математичну модель їх формування, алгоритм сценарного моделювання та методику розрахунку інтегрального індексу $R(S)$. Представлено методологію аналізу, оцінювання та управління ризиками, сформовано трифакторну матрицю ризиків і визначено алгоритми пріоритизації заходів.

Важливим є поєднання експертних оцінок із гідравлічним та геопросторовим моделюванням, що дає змогу оцінювати можливі наслідки аварійних сценаріїв, визначати найбільш уразливі ділянки мережі та обґрунтовувати пріоритетні заходи щодо підвищення стійкості. Запропоновані підходи забезпечують перехід від якісного аналізу загроз до їх кількісного оцінювання та створюють основу для обґрунтованого прийняття управлінських і технічних рішень.

У четвертому розділі

здійснено математичну формалізацію багатокритеріальної задачі підвищення стійкості систем, визначено простір керованих рішень, зовнішніх збурень та обмежень, побудовано діаграму Ісікави та застосовано метод аналізу ієрархій. На основі проведених розрахунків продемонстровано можливість підвищення інтегрального показника стійкості з 0,61 до 0,79 унаслідок реалізації комплексу превентивних заходів.

Розроблено орієнтовний план дій підприємства в умовах надзвичайних ситуацій та воєнних загроз, спрямований на забезпечення безперервності функціонування систем. Важливим є поєднання кількісного оцінювання рівня стійкості з причинно-наслідковим аналізом факторів, які можуть ініціювати або посилювати розвиток аварійних ситуацій. Такий підхід дає змогу обґрунтувати пріоритетність превентивних заходів та підвищити ефективність управління стійкістю систем.

У п'ятому розділі

наведено техніко-економічне обґрунтування запропонованих рішень та визначено інструменти їх практичної реалізації. Сформовано модель

консолідації фінансових потоків, розроблено інвестиційні пакети за напрямками підвищення безпеки, енергоавтономності та модернізації мереж, проведено аналіз чутливості до зміни CAPEX, вартості електроенергії та строків фінансування. Запропоновано критерії оцінювання інвестиційної зрілості проєктів і механізм використання показника BCR_{res} для визначення пріоритетності заходів.

Важливим результатом є поєднання технічної доцільності запропонованих рішень, рівня ризику та наявних ресурсних обмежень підприємств. Такий підхід дає змогу обґрунтовано визначати пріоритетні напрями інвестування та формувати послідовність реалізації заходів, спрямованих на підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення.

Загальні висновки відображають основні результати проведеного дослідження, узгоджуються з поставленими метою і завданнями та підтверджують завершеність дисертаційної роботи. У додатках наведено список публікацій, документи щодо практичного використання результатів та матеріали апробації розроблених підходів на прикладі міста Дніпра, зокрема результати аналізу ризиків, матрицю ризиків, Стратегію підвищення стійкості до 2030 року та план її реалізації. Це підтверджує практичну спрямованість отриманих результатів і посилює доказову базу дисертаційної роботи.

Повнота викладення основних результатів у наукових публікаціях та апробація

Основні результати дисертації опубліковано у 15 наукових працях, серед яких 10 статей у наукових фахових виданнях України та іноземних журналах, у тому числі дві статті у виданнях, що індексуються базами Scopus/Web of Science, вісім статей у фахових виданнях категорії «Б», одна стаття у виробничо-практичному журналі та чотири тези доповідей. Положення роботи представлено на міжнародних науково-практичних конференціях у 2022, 2024 та 2025 роках, а також на фаховому семінарі для підприємств і органів місцевого самоврядування. Тематика публікацій охоплює енергетичну сталість, децентралізоване водопостачання, аналіз небезпек, ризики застосування газоподібного хлору, гідравлічне моделювання, показники поточного стану і розвитку систем та математичні моделі підвищення їх стійкості. Опубліковані праці достатньо повно відображають основний зміст і результати дисертації. Особистий внесок здобувачки у спільних публікаціях конкретизовано.

Дотримання принципів академічної доброчесності

За результатами аналізу представленої дисертаційної роботи її структура, посилання на використані джерела, наведення результатів спільних досліджень та визначення особистого внеску здобувачки відповідають загальним вимогам академічної доброчесності. Ознак привласнення чужих результатів або подання опублікованих даних без належного посилання під час аналізу дисертації не виявлено. Використані положення інших авторів супроводжуються посиланнями на відповідні джерела, а результати, що становлять основу наукової новизни, представлені як власні наукові напрацювання здобувачки.

Дискусійні положення та зауваження

Високо оцінюючи науковий рівень, системність і практичну спрямованість роботи, необхідно висловити такі зауваження та питання дискусійного характеру, пов'язані передусім із формалізацією надійності, стійкості, вразливості, ризику та безпеки складних систем питного водопостачання та водовідведення:

1. У дисертації одночасно використовуються категорії надійності, стійкості, вразливості, ризику та безпеки, а інтегральний індекс $R(S)$ формується на основі часткових критеріїв, пов'язаних із цими характеристиками. Для практичного застосування методики доцільно чіткіше формалізувати функціональні зв'язки між зазначеними категоріями та визначити вихідні й похідні показники. Особливої уваги потребує уникнення подвійного врахування одного й того самого небезпечного чинника в оцінці вразливості, ризику та стійкості.
2. Трифакторна матриця ризиків є зручним інструментом оцінювання та ранжування загроз, однак у складних системах водопостачання і водовідведення небажані події можуть бути взаємозалежними та розвиватися за каскадним механізмом. Доцільно було б розглянути доповнення матричного підходу логіко-графічними методами, зокрема «деревом відмов» або «деревом подій», для встановлення причинно-наслідкових зв'язків, мінімальних перерізів відмов і спільних причин порушення роботи взаємопов'язаних елементів. Це особливо актуально для сценаріїв одночасного знеструмлення, пошкодження насосних станцій та втрати технологічних бар'єрів.
3. Запропонований інтегральний індекс $R(S)$ переважно використовується для порівняння станів і сценаріїв, тоді як у реальних умовах істотне значення мають часові характеристики розвитку небажаних процесів. Для подальшого розвитку моделі доцільно врахувати швидкість деградації функцій, момент досягнення критичних значень і тривалість перебування системи у

небезпечному або обмеженому режимі. Це дасть змогу точніше оцінювати сценарії поступового накопичення відхилень і зниження функціональних можливостей системи.

4. При оцінюванні технологічної стійкості доцільно детальніше врахувати надійність окремих функціональних блоків водоочищення та їх взаємодію в послідовних і резервованих схемах. Важливими є ймовірності часткових відмов блоків, рівень технологічного резервування та залежність ефективності наступних стадій очищення від роботи попередніх. Така структурна декомпозиція підвищила б можливості практичного застосування підходу до конкретних водоочисних споруд.

5. Для переходу від розрахункової оцінки ризику до управлінського рішення бажано чіткіше формалізувати критерії його прийнятності та відповідні порогові значення для віднесення ризику до допустимої, контрольованої або неприйнятної області. Доцільно також пов'язати ці пороги із системою попереджувальних індикаторів та умовами переходу на резервні режими функціонування. Це підвищило б однозначність практичного використання результатів оцінювання ризику диспетчерськими та управлінськими службами.

6. Інтегральний індекс $R(S)$ формується на основі кількох часткових критеріїв із використанням вагових коефіцієнтів. Водночас доцільно детальніше розкрити чутливість кінцевої оцінки стійкості до зміни вагових коефіцієнтів та вихідних експертних оцінок. Такий аналіз дав би змогу оцінити стабільність ранжування альтернативних сценаріїв і визначити критерії, які найбільше впливають на кінцеве значення $R(S)$.

7. Запропонована методологія апробована на матеріалах систем централізованого водопостачання та водовідведення міста Дніпра. У зв'язку з цим доцільно чіткіше визначити межі узагальнення отриманих результатів та можливості застосування індикаторів, вагових коефіцієнтів і порогових значень для інших населених пунктів з іншою структурою мереж, джерелами водопостачання, рівнем технічного зношення та характером зовнішніх загроз. Перспективним напрямом подальших досліджень є перевірка адаптивності методики на декількох об'єктах із різними вихідними умовами та визначення необхідності коригування її параметрів відповідно до специфіки конкретного об'єкта.

Наведені зауваження мають переважно уточнювальний і дискусійний характер, не знижують наукової цінності одержаних результатів та можуть бути враховані під час подальшого розвитку запропонованої методології оцінювання стійкості й управління ризиками систем питного водопостачання та водовідведення.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Потапенко Світлани Павлівни «Підвищення стійкості систем питного водопостачання та водовідведення» є завершеною самостійною кваліфікаційною науковою працею, у якій отримано нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності розв'язують актуальне науково-практичне завдання підвищення стійкості критичної водної інфраструктури на основі ризик-орієнтованого планування, логіко-математичного і гідравлічного моделювання, багатокритеріального оцінювання та техніко-економічного обґрунтування. Важливим результатом є розвиток взаємопов'язаного інструментарію оцінювання стійкості, вразливості та ризиків, що дозволяє переходити від ідентифікації загроз до формування превентивних технічних і управлінських заходів.

За актуальністю, науковою новизною, теоретичним і практичним значенням, обґрунтованістю висновків, повнотою оприлюднення результатів та рівнем виконання дисертаційна робота відповідає вимогам Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44 (зі змінами), а її авторка, Потапенко Світлана Павлівна, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 19 – Архітектура та будівництво за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія.

Рецензентка,
доцентка кафедри водопостачання та водовідведення
Київського національного університету
будівництва і архітектури,
кандидат технічних наук, доцент

Інга УРЯДНІКОВА