АНОТАЦІЯ

Боднар Т.С. Локалізація прихованих витоків на магістральних водоводах і зонних водопровідних мережах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія (19 – Архітектура та будівництво). Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, 2025.

У сучасних умовах значної зношеності водопровідних мереж, підвищення вартості водних ресурсів та енергетичних витрат проблема втрат води, зокрема прихованих витоків, набуває критичного значення для забезпечення сталого водопостачання. За даними світової практики, приховані витоки становлять від 10% до 50% від загальних втрат у системах водопостачання залежно від віку та технічного стану трубопроводів. В Україні проблема прихованих витоків особливо актуальна внаслідок старіння інженерної інфраструктури міст, обмежених фінансових ресурсів на модернізацію мереж і недостатнього рівня впровадження сучасних технологій виявлення витоків.

Приховані витоки призводять до зниження ефективності роботи систем водопостачання, збільшення витрат електроенергії на перекачування води, погіршення якості послуг споживачам, збільшення ймовірності аварійних ситуацій, що вимагає пошуку нових, більш ефективних методів їх виявлення та локалізації. При цьому витрати на пошук прихованих витоків традиційними методами залишаються високими, а час виявлення – надто тривалим.

Комплексний підхід до вирішення задачі виявлення витоків води з водопровідних мереж із використанням спеціалізованого обладнання, постійного моніторингу параметрів системи та сучасних інформаційних технологій забезпечує оперативне виявлення аварійних ділянок і сприяє значному зниженню експлуатаційних витрат у секторі водопостачання. Важливу роль у цьому процесі відіграє впровадження зонування мереж (DMA-зон), активний контроль і стабілізація тиску, а також локальний моніторинг

витрат. Контрольоване зниження тиску в зонах із підвищеними втратами води є одним з найефективніших заходів зменшення витоків і підвищення надійності мережі.

Серед існуючих гідравлічно-базованих методів локалізації витоків, найбільш розповсюдженим є метод гідравлічного градієнта, який базується на аналізі зміни тиску вздовж ділянки трубопроводу. Однак основним обмеженням методу є необхідність доступу до проміжних точок трубопроводу для встановлення датчиків тиску, що потребує проведення допоміжних земляних робіт, збільшує витрати часу та ресурсів.

Враховуючи недоліки існуючих методів, у дисертаційній роботі сформульовано новий підхід до виявлення та локалізації прихованих витоків води на основі статистично-гідравлічного методу. Розроблений метод дозволяє за мінімальною кількістю доступних вимірювань тиску та витрат виконати локалізацію місця витоку з високою точністю, що підтверджено чисельним моделюванням та натурними експериментами.

Дослідження виконано з використанням методів гідравлічного аналізу, математичного моделювання, статистичної обробки результатів натурних експериментів. Використано класичні та сучасні підходи до аналізу похибок вимірювання, зокрема застосовано критерії Кохрена, Стьюдента і Фішера для перевірки однорідності дисперсій, оцінки достовірності регресійних залежностей і визначення статистичної значущості факторів.

Для теоретичного обґрунтування статистично-гідравлічного методу локалізації прихованих витоків води було виконано чисельне моделювання похибок визначення координат місця витоку залежно від основних вхідних параметрів системи, таких як: діаметр трубопроводу, надлишковий тиск у мережі, площа отвору витоку, безрозмірна витрата витоку та відносна координата витоку на ділянці.

Важливою особливістю дослідження є врахування ймовірності багатоаварійності ділянок водопровідної мережі. Для оцінки цієї ймовірності була застосована модель незалежних подій Пуассона. За гіпотезами

стаціонарності, ординарності аварій та відсутності взаємозалежності подій отримано аналітичні залежності, що дозволяють оцінювати ризик виникнення множинних витоків залежно від питомої аварійності, довжини ділянки та часу, необхідного для ліквідації витоку.

Було встановлено, що при питомій річній аварійності понад 0,5 витоку на 1 км у поєднанні з тривалим часом локалізації одного витоку (понад 48 годин) ризик виникнення множинних аварій значно зростає. Це обґрунтовує необхідність максимально швидкої ліквідації виявлених витоків для мінімізації ризиків.

Розробка статистично-гідравлічного методу локалізації витоків базувалася на аналізі впливу вхідних гідравлічних параметрів на координату витоку та приведену похибку локалізації. У загальному випадку координата точки витоку X є функцією 11 розмірних вхідних параметрів: $X = F\ (z_1;\ z_2;\ p_1;\ p_2;\ \gamma;\ L;\ D;\ \Delta_e;\ Q_1;\ Q_2;\ \nu)$. Застосовуючи π-теорему Бекінгема, відносну координату X/L можна представити як функцію восьми безрозмірних комплексів: $X/L = F\ (I;\ \Delta_e/D;\ \Delta Q/Q;\ \mathrm{Re}_1;\ \mathrm{Re}_2;\ \mathrm{Eu};\ \omega_o/\omega_{тр})$.

На чисельній імітаційній моделі виконано теоретичні дослідження з визначення систематичних приведених похибок статистично-гідравлічного методу залежно від п’яти основних вхідних параметрів: безрозмірної витрати витоку, діаметра трубопроводу, площі отвору, надлишкового тиску на ділянці та відносної координати витоку. Отримані лінії тренду можуть бути рекомендовані для коригувального уточнення очікуваної координати точки витоку.Для кожного параметра побудовано окремі графіки залежностей середніх похибок та стандартних відхилень похибок, що дозволяють здійснювати корекцію очікуваного місця витоку з урахуванням конкретних умов ділянки.

Встановлено, що основним фактором похибки в методі гідравлічного градієнта є точність вимірювання тиску, тому для забезпечення надійних результатів рекомендується застосування приладів з високим класом точності (не гірше 0,25), також великий вплив на систематичну похибку локалізації

витоків має відносна координата витоку X/L, дещо менший вплив справляє діаметр трубопроводу D. Площа отвору витоку ω_0 та безрозмірна витрата витоку $\Delta Q/Q$ мають відносно невеликий вплив на похибку локалізації і можуть бути виключені при побудові наближених моделей. Похибки були проаналізовані шляхом побудови багатофакторних регресійних моделей із визначенням стандартних відхилень і середніх квадратичних похибок для кожного параметра.

Розроблений статистично-гідравлічний метод локалізації витоків води відзначається рядом важливих переваг, що забезпечують його практичну ефективність. Завдяки статистичній обробці пакетів точок вимірювання досягається висока точність визначення координати витоку. Метод дозволяє працювати зі стандартним обладнанням для вимірювання тиску і витрати води, що виключає необхідність проведення допоміжних розкопок для встановлення додаткових вимірювальних пристроїв уздовж трубопроводу. Запропонований статистично-гідравлічний метод реалізовано у вигляді алгоритму в середовищі Microsoft Excel із застосуванням макрокоманд для автоматизації розрахункових процедур. Такий підхід дозволяє оперативно обробляти результати польових вимірювань і отримувати координати ймовірного місця витоку з високою швидкістю та точністю без використання складного програмного забезпечення. Застосування методу істотно скорочує тривалість пошуку та ліквідації аварій, що позитивно впливає на загальну надійність функціонування водопровідних систем.

Для подальшого удосконалення прогнозування надійності водопровідних мереж у дисертаційній роботі було побудовано модель оцінки багатоаварійності на основі процесу Пуассона. Була введена оптимізаційна функція F_{opt}, яка характеризує співвідношення приведеної похибки локалізації витоку до ймовірності виявлення витоку після першого допоміжного розкриття трубопроводу. Це дозволило аналітично обґрунтувати ефективність застосування статистично-гідравлічного методу в порівнянні з класичним методом гідравлічного градієнта.

Враховуючи істотний вплив точності визначення коефіцієнтів гідравлічного тертя на похибку статистично-гідравлічного методу, виконано порівняльний аналіз формул для визначення коефіцієнта гідравлічного тертя. Серед явних залежностей коефіцієнта гідравлічного тертя від числа Рейнольдса у широкому діапазоні відносних шорсткостей від 0,0002 до 0,01 найкращі результати показала формула Холанда, яка забезпечує похибку в межах ±1% відносно еталонної, але неявної формули Колбрука-Вайта. Це робить формулу Холанда найефективнішою для практичного застосування в алгоритмах локалізації витоків за статистично-гідравлічним методом.

Для верифікації розробленого методу проведено натурні дослідження на водопровідних мережах міст Львова та Кам'янця-Подільського. Під час випробувань здійснювалися вимірювання тиску і витрати води на початку та кінці досліджуваних ділянок із встановленням реальних місць витоків після проведення розкопок. Отримані результати натурних експериментів підтвердили високу точність статистично-гідравлічного методу: середня приведена похибка визначення координати витоку склала не більше 2%, що відповідає високим стандартам точності для гідравлічно-базованих методів.

Запропонований метод дозволяє значно скоротити час локалізації витоку: замість традиційних 72 годин, необхідних для виявлення і усунення витоку класичними методами, статистично-гідравлічний метод забезпечує виявлення витоку та орієнтовну локалізацію за 8–16 годин. Це в 4–6 разів швидше, ніж при використанні традиційних підходів, що критично важливо для мінімізації експлуатаційних втрат. На основі отриманих експериментальних і теоретичних результатів розроблено математичну модель визначення економічного ефекту від впровадження статистично-гідравлічного методу. Модель враховує економію водних ресурсів за рахунок скорочення термінів ліквідації витоків, економію електроенергії на підйом води, зменшення витрат на очистку води, а також зниження затрат на обслуговування персоналом.

Розрахунки, виконані для водогону м. Кам'янець-Подільський, показали, що економічний ефект від впровадження статистично-гідравлічного методу

складає близько 48,3 тис. грн на один витік. За фактичної середньої кількості виявлених прихованих витоків у розмірі 100 випадків на рік загальний економічний ефект може сягати 4,83 млн грн на рік.

Крім того, скорочення термінів ліквідації витоків суттєво зменшує споживання електроенергії насосними станціями, що є важливим чинником в умовах постійного зростання тарифів на електроенергію і необхідності підвищення енергоефективності систем водопостачання.

Таким чином, дисертаційною роботою вирішено важливу науково-практичну задачу удосконалення методів локалізації прихованих витоків води в напірних водопровідних мережах за рахунок розробки статистично-гідравлічного підходу, що базується на комплексному врахуванні впливу основних гідравлічних параметрів і статистичних властивостей витоків. Отримані результати дослідження сприятимуть підвищенню ефективності роботи водопровідних мереж та забезпеченню сталого розвитку систем централізованого водопостачання в Україні.

Таким чином, у дисертаційній роботі вирішено важливе науково-прикладне завдання удосконалення методів локалізації прихованих витоків води, що має значний потенціал для підвищення ефективності функціонування систем централізованого водопостачання.

Ключові слова: клас точності, прихований витік, гідравлічний градієнт, проблема багатоаварійності, відносна похибка, водопровідна мережа, втрати напору, водопровідні системи, точність вимірювання.

Список публікацій здобувача:

– у наукових періодичних виданнях, що включені до міжнародних науково-метричних баз:

1. Bodnar T., Makovskyi Y., Zhuk V. Localization of hidden leaks in water supply networks by hydraulic methods. Pollack Periodica. 2024. (In Press). https://doi.org/10.1556/606.2024.01181. (Scopus, квартиль Q3, Web of Science).

– у науковому фаховому видані України:

2. Zhuk V., Bodnar T. Probability of simultaneous multiple leakages at sections of water networks in the process of localization of hidden water leaks. Theory and Building Practice. 2023, Vol. 5, № 1, P. 72–83. https://doi.org/10.23939/jtbp2023.01.072

– які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

3. Bodnar T.S., Zhuk V.M. Structure of hidden leakages from pressure water networks 20TH International Scientific-Practical Conference “Resources of natural waters in Carpathian region” Problems of protection and rational exploitation", Львів, Україна. 2022. С. 170-172.

4. Боднар Т.С., Тестування похибок локалізації прихованих витоків за удосконаленим гідравлічним методом, XXII Міжнародна науково-практична конференція «Multidisciplinary academic research, innovation and results», 2022, Прага, Чехія, с.717-719 DOI: 10.46299/ISG.2022.1.22

5. Боднар Т.С., Жук В.М. Відносні похибки локалізації одиночних прихованих витоків у водопровідних мережах за методом гідравлічного градієнта // XXI Міжнародна науково- практична конференція "Ресурси природних вод Карпатського регіону". Львів, Україна. 2023. С. 77-79

6. Боднар Т.С., Методи та підходи до локалізації прихованих витоків у водопровідних мережах Priority areas of research in the scientific activity of teachers», 2024, Загреб, Хорватія, с. 230–233 DOI 10.46299/ISG.2024.1.8.

7. Боднар Т.С., Сучасні системи для виявлення прихованих витоків води. XII Міжнародна науковопрактична конференція «Development of theories and methods of education of past years», 2024, Антверпен, Брюссель.

ABSTRACT

Bodnar T.S. Localization of Hidden Leaks in Trunk Water Mains and Zonal Water Supply Networks**.** – Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Specialty 192 – Construction and Civil Engineering (Field 19 – Architecture and Construction). Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2025.

In modern conditions of significant deterioration of water supply networks, rising costs of water resources, and increasing energy consumption, the issue of water losses—particularly hidden leaks—has become critically important for ensuring sustainable water supply. According to global practices, hidden leaks account for 10% to 50% of total losses in water supply systems, depending on the age and technical condition of the pipelines. In Ukraine, the problem of hidden leaks is particularly acute due to the aging of urban infrastructure, limited financial resources for network modernization, and insufficient implementation of modern leak detection technologies.

Hidden leaks reduce the efficiency of water supply systems, increase electricity consumption for water pumping, worsen service quality for consumers, and raise the risk of emergencies. This necessitates the search for new, more efficient methods of leak detection and localization. However, traditional leak detection methods remain costly and time-consuming.

A comprehensive approach to solving the problem of leak detection—through the use of specialized equipment, continuous monitoring of system parameters, and modern information technologies—enables the prompt identification of emergency areas and significantly reduces operational costs in the water supply sector. Network zoning (DMA zones), active pressure control and stabilization, and local consumption monitoring play a crucial role in this process. Controlled pressure

reduction in zones with high water losses is one of the most effective measures for leak reduction and network reliability improvement.

Among existing hydraulically based leak localization methods, the most common is the hydraulic gradient method, which analyzes pressure changes along a pipeline section. However, its main limitation is the need for access to intermediate points of the pipeline to install pressure sensors, requiring excavation work and increasing time and resource costs.

Given the limitations of existing methods, this dissertation presents a new approach to the detection and localization of hidden water leaks based on a statistical-hydraulic method. The developed method allows high-accuracy localization of the leak location using a minimal number of pressure and flow measurements, which is confirmed by numerical simulations and field experiments.

The research employed hydraulic analysis methods, mathematical modeling, and statistical processing of field experiment results. Both classical and modern approaches to measurement error analysis were used, including Cochran's, Student's, and Fisher's criteria to verify variance homogeneity, assess the reliability of regression dependencies, and determine statistical significance.

To theoretically substantiate the statistical-hydraulic method of hidden leak localization, numerical modeling of localization error based on system input parameters was conducted, such as pipeline diameter, excess pressure in the network, leak orifice area, dimensionless leak flow rate, and relative leak location.

A key feature of the study is the consideration of the probability of multiple simultaneous leaks in network sections. The Poisson model of independent events was used to assess this probability. Based on the assumptions of stationarity, ordinariness, and independence of accidents, analytical expressions were obtained to estimate the risk of multiple leaks depending on specific failure rates, pipeline length, and the time required for leak elimination.

It was found that with a specific annual failure rate exceeding 0.5 leaks/km and a long localization time (over 48 hours), the risk of multiple leaks increases significantly. This justifies the need for rapid response and leak repair to minimize risks.

The development of the statistical-hydraulic leak localization method was based on analyzing the influence of input hydraulic parameters on the leak location and the resulting localization error. In general, the leak point coordinate X is a function of 11 dimensional input parameters: $X = F(z_1, z_2, p_1, p_2, \gamma, L, D, \Delta e, Q_1, Q_2, v)$.Using Buckingham's π-theorem, the relative coordinate X/L can be represented as a function of eight dimensionless complexes: $X/L = f(I, \Delta e/D, \Delta Q/Q, Re_1, Re_2, Eu, \omega_0/\omega_{mp})$.

Theoretical studies were conducted using a numerical simulation model to determine systematic relative errors of the statistical-hydraulic method depending on five main input parameters: dimensionless leak flow rate, pipe diameter, orifice area, excess pressure, and relative leak coordinate. The resulting trend lines can be used to adjust the expected leak location. For each parameter, separate graphs of average error and standard deviation were constructed to enable corrections based on specific site conditions.

It was determined that the main source of error in the hydraulic gradient method is pressure measurement accuracy. Therefore, high-precision instruments (class accuracy not worse than 0.25) are recommended. The relative leak coordinate (X/L) has a strong impact on systematic localization error, while pipeline diameter (D) has a moderate effect. The leak orifice area (ω_0) and dimensionless leak flow rate ($\Delta Q/Q$) have relatively minor impacts and can be excluded in simplified models. Errors were analyzed using multiple regression models with the determination of standard deviations and root mean square errors for each parameter.

The proposed statistical-hydraulic leak localization method has several practical advantages. Using statistical processing of measurement point packets,

high accuracy in determining the leak coordinate is achieved. This eliminates the need for additional excavations to install sensors along the pipeline. The method was implemented in Microsoft Excel using macros to automate calculations. This approach allows fast processing of field measurement data and accurate leak location identification without complex software.

The method significantly reduces the time needed for leak localization and repair, improving the overall reliability of water supply systems.

To further enhance the reliability forecasting of water networks, a Poisson-based model for multiple leak risk assessment was developed. An optimization function Fopt was introduced, representing the ratio of relative localization error to the probability of leak detection after the first auxiliary pipeline excavation. This allowed for an analytical justification of the efficiency of the statistical-hydraulic method compared to the traditional hydraulic gradient method.

Considering the significant effect of hydraulic friction factor accuracy on localization errors, a comparative analysis of friction factor formulas was performed. Among the explicit formulas over a wide Reynolds number and relative roughness range (0.0002–0.01), the Haaland formula showed the best accuracy—within ±1% of the Colebrook-White benchmark. This makes the Haaland formula the most efficient for practical application in statistical-hydraulic leak localization algorithms.

To verify the method, field tests were conducted on water networks in Lviv and Kamianets-Podilskyi. Measurements of pressure and flow at the start and end of test sections were followed by excavations to confirm real leak locations. Field results confirmed high accuracy of the method: the average relative localization error did not exceed 2%, meeting the high standards for hydraulically based methods.

The method allows a significant reduction in localization time: from the traditional 72 hours to approximately 8–16 hours i.e. 4 to 6 times faster than classical approaches. This is critical for minimizing operational losses. Based on theoretical

and experimental data, a mathematical model for estimating the economic effect of implementing the method was developed. The model includes savings from shorter repair times, reduced water losses, energy savings for water lifting, reduced water treatment costs, and lower labour expenditures.

Calculations for the Kamianets-Podilskyi system show that the economic benefit per leak is approximately UAH 48,300. With an average of 100 hidden leaks detected annually, the total annual economic effect may reach UAH 4.83 million.

Moreover, faster leak repair reduces energy consumption by pumping stations—crucial under rising electricity tariffs and the need to improve energy efficiency in water supply systems.

Thus, the dissertation addresses a vital scientific and practical problem of improving hidden leak localization methods in pressurized water supply systems through the development of a statistical-hydraulic approach that incorporates key hydraulic parameters and statistical leak characteristics. The findings contribute to enhancing the efficiency of water supply networks and promoting sustainable development of centralized water supply systems in Ukraine.

Keywords: accuracy class, hidden leakage, hydraulic gradient, multi-leakage problem, relative error, water supply network, head loss, water supply systems, measurement accuracy.