

Міністерство освіти і науки України
Національний університет “Львівська політехніка”

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Боднар Тарас Сергійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 628.27
(індекс)

ДИСЕРТАЦІЯ

ЛОКАЛІЗАЦІЯ ПРИХОВАНИХ ВИТОКІВ НА МАГІСТРАЛЬНИХ
ВОДОВОДАХ І ЗОННИХ ВОДОПРОВІДНИХ МЕРЕЖАХ

(назва дисертації)

192 – Будівництво та цивільна інженерія
(шифр і назва спеціальності)

19 – Архітектура та будівництво
(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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

Т. С. Боднар
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник Жук Володимир Михайлович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Львів – 2025

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 витoki 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 витoki 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 витoku 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, Стюдента 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 витoku залежно від основних вхідних параметрів системи, таких як: діаметр трубопроводу, надлишковий тиск у мережі, площа отвору витoku, безрозмірна витрата витoku та відносна координата витoku 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 витoku.

Було встановлено, що при питомій річній аварійності понад 0,5 витoku на 1 км у поєднанні з тривалим часом локалізації одного витoku (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 витoku та приведену похибку локалізації. У загальному випадку координата точки витoku X є функцією 11 розмірних вхідних параметрів: $X = F(z_1; z_2; p_1; p_2; \gamma; L; D; \Delta_e; Q_1; Q_2; v)$. Застосовуючи π -теорему Бекінгема, відносну координату X/L можна представити як функцію восьми безрозмірних комплексів: $X/L = F(I; \Delta_e/D; \Delta Q/Q; Re_1; Re_2; Eu; \omega_o/\omega_{тр})$.

На чисельній імітаційній моделі виконано теоретичні дослідження з визначення систематичних приведених похибок статистично-гідравлічного методу залежно від п'яти основних вхідних параметрів: безрозмірної витрати витoku, діаметра трубопроводу, площі отвору, надлишкового тиску на ділянці та відносної координати витoku. Отримані лінії тренду можуть бути рекомендовані для коригувального уточнення очікуваної координати точки витoku. Для кожного параметра побудовано окремі графіки залежностей середніх похибок та стандартних відхилень похибок, що дозволяють здійснювати корекцію очікуваного місця витoku 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 витoku X/L , дещо менший вплив справляє діаметр трубопроводу D . Площа отвору витoku ω_0 та безрозмірна витрата витoku $\Delta Q/Q$ мають відносно невеликий вплив на похибку локалізації і можуть бути виключені при побудові наближених моделей. Похибки були проаналізовані шляхом побудови багатofакторних 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 витoku. 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 витoku 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 $\pm 1\%$ 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 виданні України:

1. 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:

2. 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.

3. Боднар Т.С., Тестування похибок локалізації прихованих витоків за удосконаленням 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

4. 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

5. 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.

6. 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, ordinarity, 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: $X = F(z_1, z_2, p_1, p_2, \gamma, L, D, \Delta e, Q_1, Q_2, \nu)$. 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 F_{opt} 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 $\pm 1\%$ 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.

ЗМІСТ

Анотація.....	2
Abstract.....	9
Зміст.....	14
Перелік умовних позначень, символів, одиниць, скорочень та термінів ...	17
Вступ.....	19
Розділ 1. Методи та засоби виявлення прихованих витоків з напірних водопровідних мереж.....	25
1.1 Приховані витoki в балансах систем водопостачання	25
1.1.1 Моніторинг технічного стану напірних водопровідних мереж	31
1.1.2 Аварійність водопровідних мереж в Україні та у Львові.....	32
1.2 Методи пошуку та локалізації прихованих витоків.....	35
1.2.1 Пошук прихованих витоків методом визначення різниці температур та газовим методом.....	36
1.2.2 Пошук прихованого витoku методом кореляції.....	37
1.2.3 Пошук прихованих витоків методом акустичних сигналів.....	39
1.2.4 Гідравлічні методи локалізації витоків води.....	42
1.3 Системи, прилади та обладнання для виявлення прихованих витоків.	46
1.3.1 Системи виявлення прихованих витоків.....	46
1.3.2 Пристрої та обладнання для виявлення витоків.....	53
1.4 Мета роботи та задачі досліджень.....	62
Розділ 2. Методика виконання дисертаційних досліджень.....	65
2.1 Планування експериментів.....	65
2.1.1 Мета та підхід до планування експерименту.....	65
2.1.2 Вибір факторів експерименту.....	65
2.1.3 Кодовані рівні факторів.....	65
2.1.4 Матриці експерименту.....	66
2.2. Опис похибок, класів точності і типових приладів вимірювального	

обладнання.....	69
2.2.1. Порівняння типових лічильників води.....	69
2.2.2 Порівняння датчиків тиску.....	71
2.2.3 Похибки вимірювання довжини трубопроводів.....	43
2.2.4. Похибки вимірювання висотних позначок (відміток).....	75
2.2.5 Детальне обґрунтування похибок прийнятих при проведенні розрахунку статистично - гідравлічним методом.....	77
2.3 Математична обробка та статистичний аналіз результатів	79
2.3.1 Математична обробка результатів.....	79
2.3.2 Статистичний аналіз результатів.....	79
2.3.3 Побудова рівнянь регресії.....	82
2.4 Висновки.....	82
Розділ 3. Теоретичне моделювання гідравлічних явищ у водопровідних мережах за наявності прихованих витоків.....	
3.1 Аналіз похибок методу гідравлічного градієнта.	84
3.2 Статистично-гідравлічний метод локалізації витоків.....	94
3.3 Вплив коефіцієнта гідравлічного тертя на похибки локалізації.....	97
3.3.1 Розрахункові залежності для коефіцієнта гідравлічного тертя.....	97
3.3.2 Порівняльний аналіз похибок визначення коефіцієнта гідравлічного тертя за різними залежностями.	98
3.4. Похибки локалізації прихованих витоків за статистично- гідравлічним методом.....	110
3.4.1 Вплив відносної координати витоку.....	110
3.4.2 Вплив транзитної витрати витоку на похибку його локалізації.....	112
3.4.3 Вплив величини витоку на похибку його локалізації.....	113
3.4.4 Вплив діаметра трубопроводу на величину приведеної похибки визначення координати.....	114
3.5. Вплив зонування водопровідної мережі на пошук і локалізацію	

прихованих витоків.....	115
3.5.1 Зонування водопровідних мереж.....	115
3.5.2 Застосування статистично-гідравлічного методу в зонованих (районованих) водопровідних мережах.....	116
3.6 Аналіз проблеми багатовитоковості на ділянці мережі.....	118
3.6.1. Діапазони та тренди зміни питомої аварійності водопровідних мереж в Україні у 2007–2020 рр.....	119
3.6.2. Результати моделювання ймовірності багатоаварійності водопровідних мереж.....	121
3.7 Висновки.....	130
Розділ 4. Техніко-економічні аспекти впровадження систем локалізації прихованих витоків.....	133
4.1. Натурна верифікація статистично-гідравлічного методу.....	133
4.2.Економічний ефект від впровадження статистично-гідравлічного методу локалізації витоків.....	142
4.3 Економічний ефект від використання статистично-гідравлічного методу локалізації прихованих витоків на прикладі водогону м. Кам'янець-Подільський.....	145
4.4. Висновки.....	147
Загальні висновки.....	148
Список використаних джерел.....	150
Додатки.....	160
Додаток А. Список опублікованих праць за темою дисертації.....	160
Додаток Б. Акт впровадження результатів дисертаційної роботи у навчальний процес НУ "Львівська політехніка".....	162
Додаток В. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи у виробництво.....	163

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- A_C – клас точності;
- D – діаметр трубопроводу, м;
- Eu – критерій Ейлера;
- F_{opt} – функція оптимізації;
- g – прискорення вільного падіння, м/с²;
- H – повний напір, м;
- h_w – втрати напору, м;
- I – гідравлічний ухил;
- L – довжина ділянки трубопроводу, м;
- L_{leak} – розрахункова координата точки витоку, м;
- N_2 – корисна потужність насоса, Вт;
- $N_{св}$ – кількість свищів;
- $N_{сн}$ – потужність, споживана насосом, Вт;
- N_L – кількість витоків;
- p – надлишковий тиск, Па;
- $\bar{p}_x$ – ймовірність виявлення витоку за методом гідравлічного градієнта;
- p_{2+} – ймовірність багатоаварійності (два і більше витоків);
- $\frac{P}{\gamma}$ – п'єзометрична висота, м;
- Re – критерій Рейнольдса;
- SE_{an} – річна питома аварійність ділянки, км⁻¹·рік⁻¹;
- STD – стандартне відхилення, %;
- q_i – питомі втрати води на витки, л/(хв·км);
- Q – об'ємна витрата, м³/с;
- t_i – час витікання води через i -ий свищ, діб;
- $T_{ЛРП}$ – тривалість локалізаційно-ремонтного періоду, діб;
- V – середня швидкість потоку, м/с;

W_1 – нормативний об'єм прихованих витоків через стики і стінки трубопроводів, м³/рік;
 W_2 – нормативний об'єм витоків води через невиявлені свищі, м³/рік;
 X – координата точки витоку, м;
 X/L – відносна координата точки витоку;
 z – геометричний напір, м;
 α – коефіцієнт кінетичної енергії;
 $\frac{\alpha V^2}{2g}$ – швидкісний напір, м;
 γ – питома вага рідини, Н/м³;
 $\varepsilon_{X_{mid}}$ – середня приведена похибка локалізації, %;
 $\Delta Q/Q$ – відносний витік;
 Δ_{ϵ} – еквівалентна шорсткість труб, м;
 Δ_{ϵ}/D – відносна шорсткість;
 ΔW – економія водних ресурсів, м³;
 η_n – коефіцієнт корисної дії насоса;
 λ – коефіцієнт гідравлічного тертя;
 μ_o – коефіцієнт витрати отвору;
 μ_T – математичне сподівання кількості витоків на ділянці;
 ρ – питома маса рідини, кг/м³;
 ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с;
 ω_i, ω_o – площа отвору i -го свища, м²;
ВНС – водопровідна насосна станція;
ІТНВПВ – індивідуальні технологічні нормативи використання питної води;
РЧВ – резервуар чистої води;
СГМ – статистично-гідравлічний метод;
СОЗВ – станція очистки та знезараження води;
IWA – International Water Association;
NRW – недохідна вода (Non-Revenue Water), м³;

ВСТУП

Актуальність теми. Актуальною проблемою водопостачання у світі є проблема прихованих витоків води з водогонів та напірних розподільних мереж. Приховані витoki становлять суттєву частку загальних втрат води в системах водопостачання, а їхня величина безпосередньо залежить від віку та технічного стану трубопроводів. На локалізацію прихованих витоків підприємства, що експлуатують системи водопостачання, витрачають значні обсяги часу та коштів, оскільки в більшості випадків необхідне застосування спеціальних приладів для пошуку.

Контрольоване зниження тиску в зонах із високими втратами є одним із найефективніших методів зменшення втрат води. Комплексний підхід до вирішення завдання виявлення витоків води з водопровідних мереж населених пунктів України із використанням спеціалізованого обладнання забезпечує оперативне виявлення аварійних районів і сприяє зменшенню експлуатаційних витрат у секторі водопостачання.

Системи постійного інтегрованого моніторингу на основі сучасних ІТ-технологій відіграють важливу роль у виявленні та зменшенні прихованих витоків. Оскільки кожна система моніторингу має свої сильні та слабкі сторони, для досягнення максимальної ефективності необхідне комбінування декількох підходів. Крім того, для подальшого підвищення ефективності систем виявлення витоків необхідне постійне проведення наукових досліджень та розробок у цій галузі.

Відомий спосіб локалізації прихованих витоків на основі методу гідравлічного градієнта є відносно ефективним як простий і доступний інструментальний метод, особливо на завершальному етапі локалізації після дистанційного моніторингу. Проте основним обмеженням методу є необхідність проведення проміжних вимірювань тиску, що потребує додаткових розкопок трубопроводів.

Враховуючи недоліки існуючих систем виявлення та локалізації витоків, зокрема методу гідравлічного градієнта, у дисертаційній роботі поставлено та вирішено наукову задачу розробки статистично-гідравлічного методу локалізації прихованих витоків, який би дозволив підвищити точність визначення місця витoku при мінімізації витрат часу та ресурсів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Тематика роботи відповідає положенням Закону України "Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки" від 11.07.2001 р. № 2623-III (зі змінами), а також Закону України "Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року" від 28.02.2019 р. №2697-VIII. Робота виконана у рамках наукової тематики кафедри гідротехніки та водної інженерії Національного університету "Львівська політехніка".

Мета роботи і завдання дослідження

Метою дисертаційної роботи є розробка статистично-гідравлічного методу локалізації прихованих витоків води та/або несанкціонованих відборів води з магістральних водоводів та ліній зонних водопровідних мереж, визначення приведених похибок, умов та діапазону застосування методу.

Для досягнення мети роботи були поставлені наступні **завдання досліджень**:

- виконати порівняльний аналіз відомих методів локалізації витоків у напірних водопровідних мережах;
- проаналізувати похибки локалізації витоків за методом гідравлічного градієнта;
- розробити статистично-гідравлічний метод локалізації прихованих витоків води та/або несанкціонованих відборів;
- здійснити чисельне моделювання похибок локалізації для основних вхідних параметрів: тиску в мережі, діаметра трубопроводу, площі отвору

витоку, безрозмірної величини витоку та відносного розташування витоку;

- розробити модель прогнозування багатоаварійності на ділянці водопровідної мережі;
- виконати натурну експериментальну верифікацію ефективності запропонованого методу;
- оцінити техніко-економічну ефективність впровадження статистично-гідравлічного методу локалізації витоків.

Об’єктом досліджень є потоки води в магістральних водоводах та на лініях зонних водопровідних мереж за наявності витоків та/або несанкціонованих відборів води.

Предметом дослідження є гідравлічно-базовані методи виявлення та локалізації прихованих витоків у напірних водопровідних мережах.

Методи дослідження. У роботі застосовано комплекс теоретичних, чисельних і експериментальних методів дослідження. Використано математичний аналіз, чисельне моделювання, математичну статистику, натурні експериментальні вимірювання параметрів водопровідних мереж із подальшою обробкою отриманих результатів.

Наукова новизна роботи полягає в:

- розробці статистично-гідравлічного методу локалізації прихованих витоків води та/або несанкціонованих відборів води з напірних водопровідних мереж;
- отриманні функціональних залежностей щодо систематичної похибки статистично-гідравлічного методу від діаметра трубопроводу, площі отвору, безрозмірної величини витоку, відносного розташування витоку на ділянці, а також надлишкового тиску як на магістральних водоводах, так на лініях зонних водопровідних мереж;
- удосконаленні методу оцінки ймовірності багатоаварійності на ділянках водопровідних мереж.

Практичне значення одержаних результатів:

- обґрунтовано межі доцільності застосування методу гідравлічного градієнта для виявлення прихованих витоків з водопровідних мереж;
- отримано кореляційні залежності для виправлення систематичних похибок, зумовлених особливостями статистично-гідравлічного методу;
- розроблено модель оцінки економічної ефективності статистично-гідравлічного методу для виявлення прихованих витоків з водопровідних мереж;
- практичне впровадження методу показало його ефективність у скороченні часу ліквідації витоків, зменшенні відповідних втрат води, а також у зниженні затрат енергії на транспортування води.

Особистий внесок здобувача. Проведено аналіз існуючих методів локалізації витоків, розроблено статистично-гідравлічний метод, виконано чисельне моделювання похибок локалізації, розроблено алгоритм автоматизації процесу локалізації прихованих витоків води, проведено натурну перевірку ефективності та обґрунтовано економічний ефект впровадження запропонованого підходу.

Розроблений статистично-гідравлічний метод локалізації прихованих витоків води у напірних водопровідних мережах базується на аналізі гідравлічних параметрів мережі та дозволяє підвищити точність та скоротити тривалість локалізації витоків.

Усі наукові результати дисертаційної роботи отримані автором особисто. У роботах, що опубліковані у співавторстві, автору належить: [1] – розроблення основ теоретичної моделі статистично-гідравлічного методу локалізації прихованих витоків та аналіз впливу гідравлічних факторів на точність локалізації; [2] – побудова моделі оцінки ймовірності виникнення багатоаварійності на ділянках водопровідних мереж у процесі локалізації витоків; [3] – дослідження структури прихованих витоків у напірних водогонях та аналіз механізмів їх виникнення; [4] – натурна експериментальна верифікація похибок локалізації витоків за удосконаленням

гідравлічним методом; [5] – чисельне моделювання відносних похибок локалізації одиночних прихованих витоків за методом гідравлічного градієнта; [6] – систематизація методів і підходів до локалізації витоків на основі огляду сучасного стану проблеми; [7] – узагальнення технічних рішень щодо виявлення прихованих витоків води та оцінка ефективності сучасних систем моніторингу.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати виконаних теоретичних і експериментальних досліджень доповідалися та обговорювалися на: XX–XXI Міжнародній науково-практичній конференції «Ресурси природних вод Карпатського регіону / Проблеми охорони та раціонального використання», Львів, Україна (2022–2023); XXII Міжнародній науково-практичній конференції «Multidisciplinary Academic Research, Innovation and Results», Прага, Чехія, 2022 року; Міжнародній науковій конференції «Priority Areas of Research in the Scientific Activity of Teachers», Загреб, Хорватія, 2024 року; XII Міжнародній науково-практичній конференції «Development of Theories and Methods of Education of Past Years», Антверпен, Брюссель, 2024 року.

Результати дисертаційного дослідження впроваджені в навчальний процес на кафедрі гідротехніки та водної інженерії НУ "Львівська політехніка", зокрема в дисципліні "Експлуатація систем водопостачання та водовідведення", що викладається для студентів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія», а також «Інноваційні технології у гідротехнічному будівництві» для студентів спеціальності 194 «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології». Розроблений в дисертації статистично-гідравлічний метод дистанційної локалізації прихованих витоків води апробовано на ЛМКП «Львівводоканал», (м. Львів) та КП «Міськтепловоденергія» (м. Кам'янець-Подільський) для впровадження при пошуках прихованих витоків води.

Публікації. Основні наукові положення, методи і результати досліджень за темою дисертаційної роботи опубліковано у 7 наукових публікаціях, у тому числі: 1 стаття у науковому виданні, що входить до наукометричної бази Scopus (квартиль Q3), 1 стаття у науковому фаховому виданні України, та 5 публікацій у матеріалах вітчизняних і міжнародних конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків і додатків. Загальний обсяг дисертації 164 сторінок, включаючи 60 рисунків, 29 таблиць, список використаних джерел із 89 назв на 9 сторінках та 3 додатків на 4 сторінках.

Розділ 1

МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ВИЯВЛЕННЯ ПРИХОВАНИХ ВИТОКІВ З НАПІРНИХ ВОДОПРОВІДНИХ МЕРЕЖ

1.1. Приховані витоки в балансах систем водопостачання

Актуальною проблемою водопостачання в світі є проблема прихованих витоків води з водогонів та напірних розподільних мереж. Приховані витоки становлять суттєву частку від загальних втрат води в системах водопостачання їх величина напряму залежить від віку та технічного стану трубопроводів. На локалізацію прихованих витоків підприємства, що експлуатують системи водопостачання, витрачають багато часу та коштів, у більшості випадків необхідне застосування спеціальних приладів для пошуку [72].

Будь-якій дискусії щодо втрат води має передувати чітке визначення балансів води у системі водопостачання. В останні десятиліття через велику різноманітність визначень та класифікацій виникла нагальна потреба в уніфікованій міжнародній термінології. Спираючись на наявний досвід технологічно найбільш розвинених країн світу, International Water Association (IWA) розробила стандартний підхід до розрахунків водного балансу (табл. 1.1) та відповідну термінологію.

Скорочені визначення основних компонентів водного балансу IWA такі:

- Вхідний об'єм системи – це річний об'єм води, який надходить у цю частину системи водопостачання;
- Дозволене споживання – це річний об'єм води з обліку та/або без обліку прийняті зареєстрованими клієнтами, постачальником води та іншими особами, які неявно або явно уповноважені на це. Він включає воду, що експортується, а також витоки та переливи після обліку.

Недохідна вода (NRW) – це різниця між вхідним об'ємом системи та об'ємом, що сплачується. NRW складається з:

- невивантаженого санкціонованого споживання (зазвичай другорядний компонент водного балансу);

- втрат води – різниці між вхідним об’ємом системи та дозволеним споживанням, складається з очевидних і реальних збитків;
- очевидних збитків – несанкціонованого споживання та неточності всіх видів вимірювань;
- реальних втрат – річних обсягів, втрачених через усі типи витоків, аварій і переливів через резервуари для обслуговування та підключення до мережі до точки вимірювання.

Через те, що термін «необлікована вода» у всьому світі тлумачиться по-різному цільові, групи IWA не рекомендують використовувати цей термін. Якщо використовується термін «Unaccounted-for water» (UFW), це слід визначати та розраховувати так само, як і «Недохідна вода» у таблиці 1.1 [54].

Таблиця 1.1 – Розподіл загального водного балансу в системах водопостачання за Міжнародним стандартом IWA [54]

Спожита вода	Оплачене водоспоживання	Вода, спожита за показами лічильників	Реалізована вода
		Вода, спожита за питомими нормами водоспоживання (без лічильників)	
	Неоплачене водоспоживання	Неоплачена вода за показами лічильників	Нереалізована вода
		Неоплачена вода за питомими нормами	
Втрати води	Неочевидні втрати	Необліковані врізки	
		Неточності вимірювання лічильниками	
	Реальні (очевидні) втрати	Витоки на магістральних та розподільчих мережах	
		Витоки і переливи з РЧВ	
		Витоки на водопровідних вводах до лічильника	

Аварійні пошкодження спричиняють пониження тиску води в мережі або ж припинення водопостачання, що тягне за собою збільшення навантаження на насосні агрегати, і відповідно збільшуються витрати на електроенергію.

Локалізація місця витoku води з трубопроводу є важливим завданням для експлуатації систем водопостачання. Пристрої, призначені для пошуку прихованих тріщин, отворів в стінках трубопроводів, резервуарів, для виявлення витоків називаються детекторами витоків. Вони дозволяють визначити місце витoku з високою точністю незалежно від типу ґрунту, глибини трубопроводу, температури рідини, тиску і інших умов експлуатації.

Інфраструктура постачання питної води є однією з найцінніших для здоров'я людей і відіграє вирішальну роль для економічного процвітання у всьому світі. Оскільки ця інфраструктура старіє та зношується за роки експлуатації, ймовірність виникнення витоків може стати критично високою. Тому боротьба з втратами води відіграє важливу роль у галузі водопостачання. Витоки можуть спричинити серйозні проблеми для навколишньої інфраструктури [43].

Проблема витоків води з напірних водопровідних мереж актуальна як з точки зору ефективності роботи підприємств водопровідного господарства, так і для екології та техногенної безпеки урбанізованих територій. Витоки води напряду залежать від віку та технічного стану водопровідних мереж.

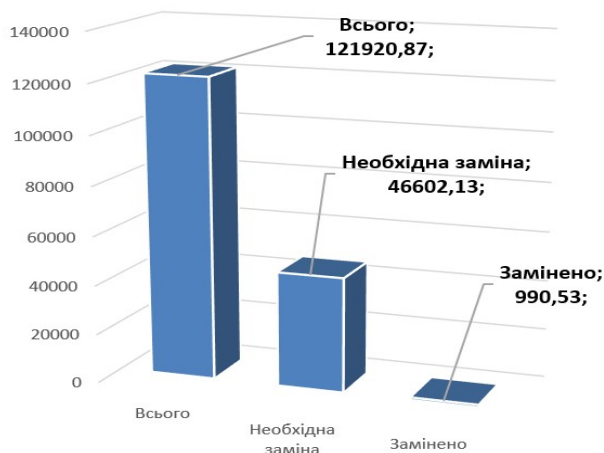


Рис. 1.1 Загальний стан водопровідних мереж в Україні, тис.км. (на 2021 р.)

Згідно з офіційними даними, у 2020 р. сумарна протяжність водопровідних мереж в Україні складала 121,921 тис. км, у тому числі старих та аварійних – 46,602 тис. км або 38,2 %, а протягом року було замінено 991 км або 2,1 % від загальної потреби [9].

Згідно зі звітом ЛМКП «Львівводоканал» за 2020р. система водопостачання м. Львова налічує 2270 кілометрів водопровідних мереж. Матеріали трубопроводів: 49% сталь, 41% – чавун, 8% – пластик, 2% – залізобетон. За терміном експлуатації 67% трубопроводів мають вік понад 35 років, та відповідно 33% експлуатуються менше 35 років. У середньому щодоби на мережах ЛМКП "Львівводоканал" ліквідують 10 видимих аварійних витоків води, так у 2020 році було ліквідовано 3202 аварії, у тому числі 104 пов'язаних з прихованими витоками води.

Визначення місць ушкодження в трубопроводах відноситься до найважливіших завдань експлуатації систем водопостачання. Враховуючи те, що велика частина таких комунікацій знаходиться під землею, для цієї мети потрібне застосування спеціальних технічних засобів. Для пошуку витоків в трубопроводах, що працюють під тиском, широке поширення отримали акустичні і кореляційні шукачі прихованих витоків [18,72].

Найбільше трубопроводів, які використовуються сьогодні в Україні для водопостачання, – чавунні (48,8% загальної протяжності) та сталеві (44,8%), пластикові труби складають лише 3,4% [72].

Втрати води на витoki з напірних трубопроводів залежать головним чином від віку мережі, матеріалу труб, особливості експлуатації, кількості свищів, несанкціонованих приєднань, неврахованих витрат води, а також надмірних надлишкових тисків у мережі. Рівень схованих витоків пов'язаний з протіканнями через стики і стінки трубопроводів, а також з наявністю невиявлених свищів.

Згідно з методикою [9], при розрахунку "Індивідуальних технологічних нормативів втрат питної води" значення прихованих витоків через стики і стінки трубопроводів визначають за формулою:

$$W_1 = \sum 525,6 \times K \times L_i \times q_i \times \sqrt{H_{сер}/60}, \text{ м}^3/\text{рік} \quad (1.1)$$

де K – коефіцієнт, який залежить від віку трубопроводів;

L_i – довжина i -тої ділянки трубопроводу, км;

q_i – допустимий рівень витоків води на ділянці трубопроводу довжиною 1 км при остаточних випробуваннях на герметичність, л/хв.; залежить від матеріалу труб, типу стиків; для сталевих труб значення q_i приймають за даними табл. 6 ДСТУ-Н Б В.2.5-68:2012, а для пластикових труб – за табл. 5 ДСТУ-Н Б В.2.5-40:2009;

$H_{сер}$ – середній тиск води в мережі з урахуванням графіка подачі води, м.в.ст.;

525,6 – коефіцієнт для перерахунку величини витoku з л/хв на м³/рік.

Норматив витоків води, яка протікає через невиявлені свищі [9]:

$$W_2 = 9568 \times N_{св} \times \sum (t_i \times \omega_i \times \sqrt{H}), \text{ м}^3/\text{рік}, \quad (1.2)$$

де $N_{св}$ – кількість невиявлених свищів; t_i – час витікання через невиявлені свищі протягом року; ω_i – площа отвору свища; за відсутності фактичних даних приймається згідно [9] рівною 2 см²; H – середній тиск води в мережі у місцях виникнення невиявлених свищів, м. вод.ст.

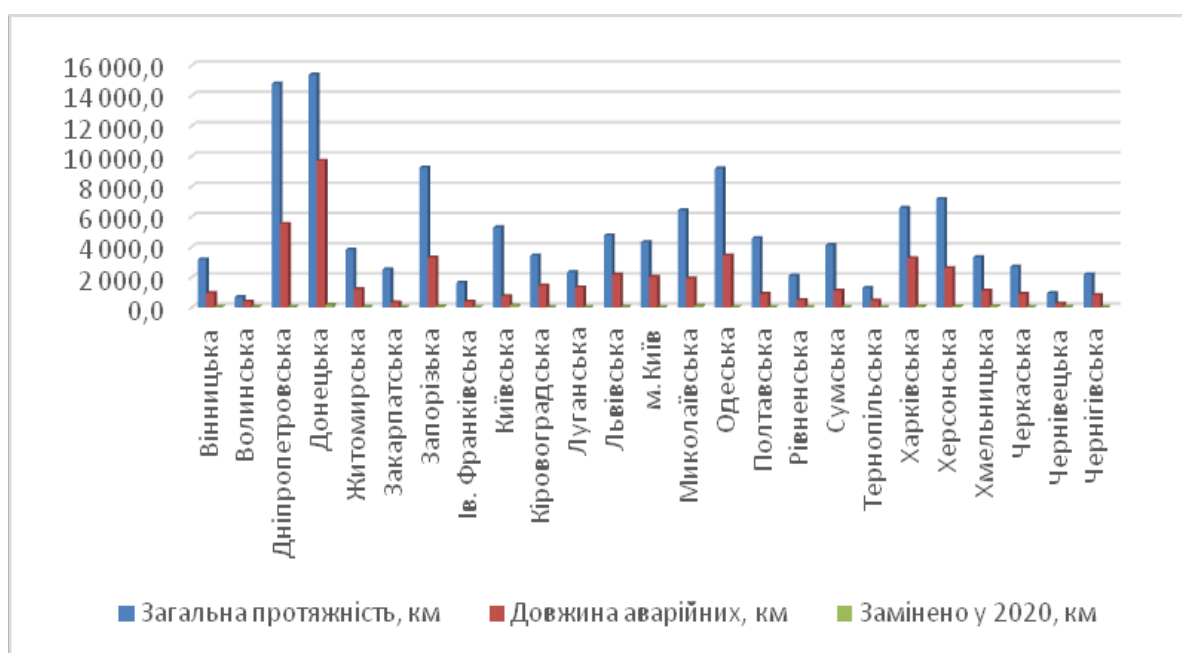


Рис. 1.2 Довжина аварійних водопровідних мереж, км (на 2021 рік)

Таблиця 1.2 – Аварійні мережі водопостачання в Україні станом на 2020 р.

Область	Загальна протяжність, км	Аварійність, аварії на 1 км мереж, рік ⁻¹	Довжина аварійних ділянок, км
Вінницька	3 173,1	2,6	936,1
Волинська	685,1	1,65	385,7
Дніпропетровська	14 796,0	1,9	5518,9
Донецька	15 384,5	32,26	9692,2
Житомирська	3 824,6	2,1	1212,4
Закарпатська	2 507,2	1,38	315,9
Запорізька	9 234,4	1,81	3287,4
Івано-Франківська	1 631,0	1	384,9
Київська	5 291,1	6,38	751,3
Кіровоградська	3 430,7	1,03	1444,3
Луганська	2 331,4	0,99	1319,6
Львівська	4 766,1	1,96	2168,6
м. Київ	4 312,6	0,44	2005,4
Миколаївська	6 416,3	1,1	1905,6
Одеська	9 190,4	4,92	3437,2
Полтавська	4 582,3	2,35	893,6
Рівненська	2 084,2	0,9	491,9
Сумська	4 119,0	0,4	1099,8
Тернопільська	1 291,1	2,4	457,0
Харківська	6 581,1	2,5	3251,1
Херсонська	7 160,9	0,042	2599,4
Хмельницька	3 325,3	3,1	1104,0
Черкаська	2 686,3	1,2	891,9
Чернівецька	936,5	0,24	255,7
Чернігівська	2 179,7	0,7	813,0
РАЗОМ:	121 921	5,87	46 602

Формула (1.2) безпосередньо впливає з формули витрати напірного потоку крізь малий отвір при значенні коефіцієнта витрати $\mu=0,6$:

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH}. \quad (1.3)$$

Кількість невиявлених свищів оцінюється за формулою

$$N_{cv} = 0,0007 \times T \times N, \quad (1.4)$$

де N – середньорічна кількість аварій; T – середній строк служби трубопроводів.

Порівняння поточних значень нормативних втрат води в ряді українських міст (табл. 1.3) вказує на суттєві відхилення від теоретичних пропорцій, що впливають з формул (1.1) та (1.2). Це потребує більш глибокого аналізу структури прихованих витоків для виявлення фактичних значень витоків.

Таблиця 1.3 – Втрати води в різних містах України за поточними ІТНВПВ

Місто	Питомі витоки питної води, $\text{м}^3/1000\text{м}^3$	У тому числі		W_2/W_1
		приховані витоки води з трубопроводів W_1	витоки води крізь невиявлені свищі W_2	
Винники	229,72	181,08	161,82	0,894
Луцьк	250,82	108,29	0	—
Львів	300	131,01	—	—
Запоріжжя	234,54	142,93	—	—
Кам'янець- Подільський	176,54	46,8	2,48	0,053
Нововолинськ	231,17	186,12	—	—
Хмельницький	225,943	141,866	69,44	0,489

1.1.1. Моніторинг технічного стану напірних водопровідних мереж

Відносні втрати води в системах водопостачання в цілому по світу оцінюються в середньому на рівні 30% від піднятої води [32]. У розрізі найбільших міст ця частка змінюється від 3% у Токіо і Амстердамі та 4% в Берліні, 13% у Лондоні та 15% у Лос-Анджелесі до 54% у Олександрії та 58% у Манілі [32, 56] (рис. 1.3). У Польщі такий показник становить близько 18% [71]. Втрати води в найбільших містах України оцінюються в середньому на рівні 33,7%, зокрема в Києві ця частка становить 30%, а у Львові – 46% від піднятої води [10]. Наразі більшість українських водоканалів реагують на витіки ситуативно, виконуючи ремонт лише тоді, коли витік видно на поверхні. Існує потреба у більш раціональних і системних стратегіях

управління інфраструктурою. Моніторинг мереж водопостачання може цьому сприяти, і засновані на сенсорах діагностичні методики мають потенціал для детального виявлення витоків у мережах.

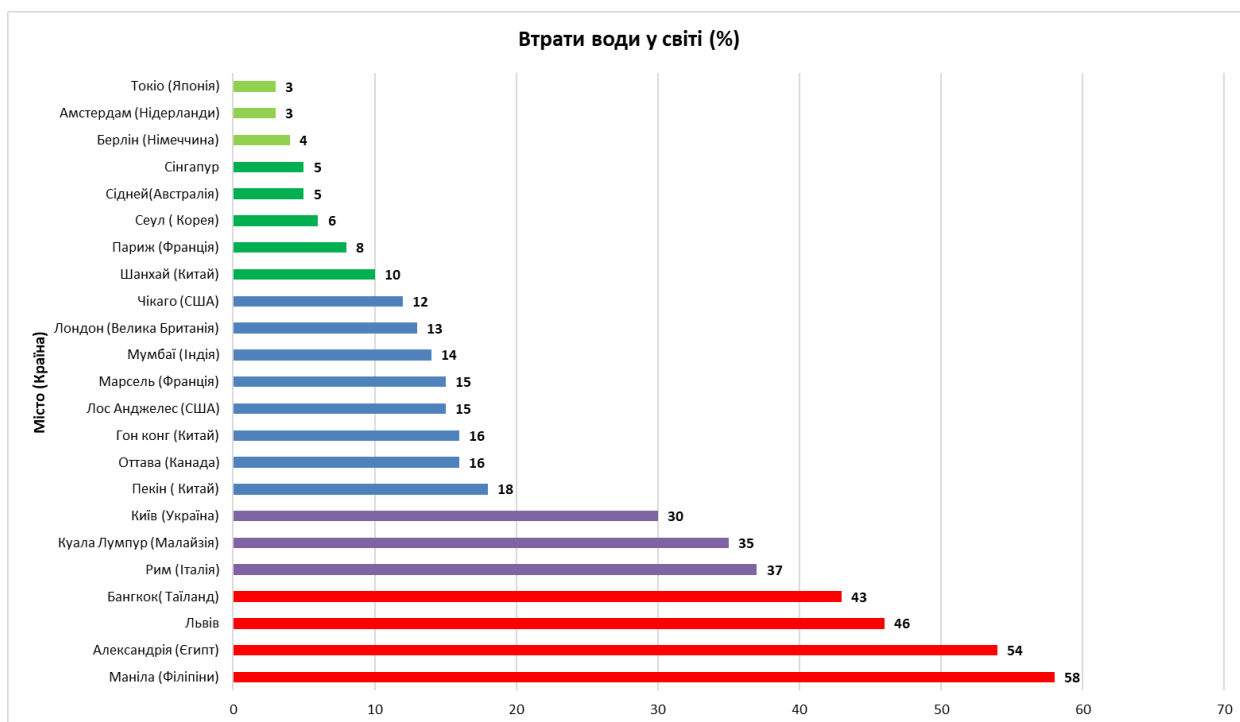


Рис. 1.3 Частка загальних втрат води в системах централізованого водопостачання різних міст Світу [10, 32,56]

1.1.2 Аварійність водопровідних мереж в Україні та у Львові

Водна Стратегія України на період до 2050 року констатує поточний "незадовільний технічний стан, зношеність та недостатню розгалуженість систем централізованого водопостачання", а також наявність значних втрат водних ресурсів у системах централізованого водопостачання внаслідок негерметичності мереж та ненадійності запірно-регулювальної арматури [2]. У цьому нормативному документі поставлено амбітну ціль щодо зменшення питомої аварійності мереж централізованого водопостачання на 3% щороку, беручи за вихідний показник $3,1 \text{ км}^{-1}\text{рік}^{-1}$. Застосовуючи принцип складного процента, це відповідає виходу на показник $2,0 \text{ км}^{-1}\text{рік}^{-1}$ у 2037 р., та на питому аварійність $1,32 \text{ км}^{-1}\text{рік}^{-1}$ у 2050 р.

Загалом водопровідні мережі в Україні станом на 2023 рік є в складному технічному стані. У цьому дослідженні використані також статистичні матеріали щодо питомої аварійності водопровідних мереж в різних областях України, представлені у Національних доповідях про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні за 2007–2020 роки. Аналіз проблеми багатоаварійності на водопровідній мережі м. Львова виконано на підставі статистичної звітності ЛМКП "Львівводоканал" за 2020 р., згідно з якою довжина водопровідних мереж у місті Львів становить 2416,48 км, з них зношених та аварійних – 1342,58 км, що складає 55,56%. У структурі матеріалів водопровідних труб переважають сталеві (49%) та чавунні (41%) труби, тоді як на новіші труби з пластикових матеріалів припадає біля 8% загальної протяжності мереж; решта 2% складають залізобетонні труби. Загалом у 2020 році на Львівській водопровідній мережі було ліквідовано 3202 аварії, що становить у середньому 8,8 аварій на добу; з них 104 аварійних ситуації, тобто 3,25% від загальної кількості були пов'язані з прихованими витокami води. Фактична питома аварійність на Львівському водопроводі у 2020 р. становила 1,41 аварії на 1 км.

Статистичний аналіз розподілу щорічних питомих аварійних показників (SE_{an}) водопровідних мереж в різних регіонах України за 2020 рік вказує на дуже великий розкид значень. Офіційні дані по Донецькій та Херсонській областях було вилучено зі статистики через аномально високе значення для Донецької області ($32,26 \text{ км}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$) та дуже низьке для Херсонської ($0,042 \text{ км}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$), що значно впливали на середнє значення. Також відсутні дані по Криму у зв'язку з окупацією. Середньозважене за довжиною значення питомого показника аварійності водопровідних мереж в Україні у 2020 році, без урахування даних по Донецькій, Херсонській областях та Криму, становило $SE_{mid} = 2,21 \text{ км}^{-1} \cdot \text{рік}^{-1}$.

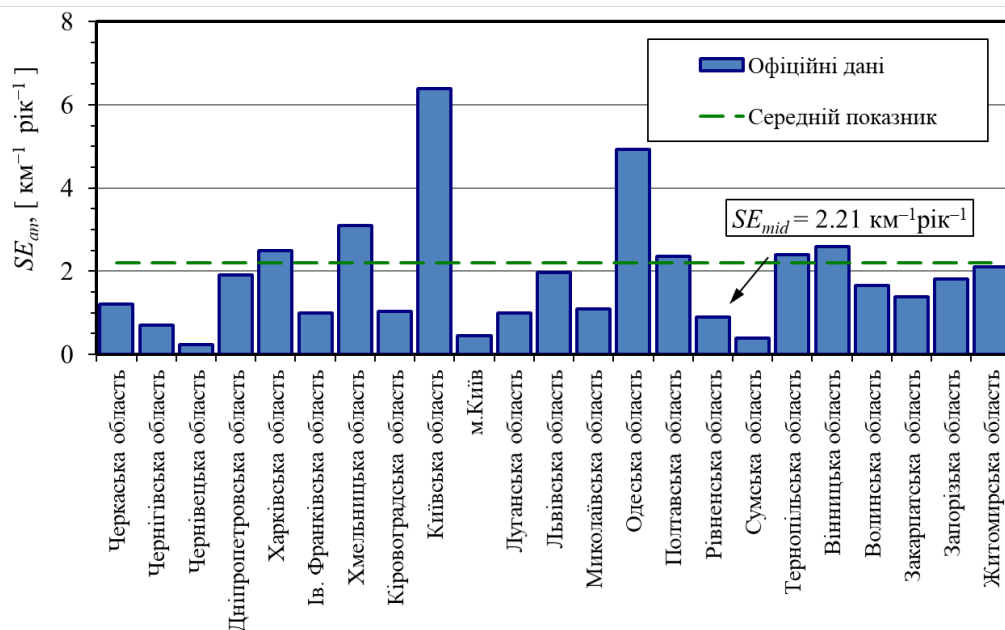


Рис. 1.4 Річна питома аварійність мереж, станом на 2020р. (Джерело: [10])

Середньорічна кількість витоків на 1 км водопроводу у Львівській області – 1,96, а у місті Львів – 2,12. Постійний моніторинг стану мережі у Львові здійснюється за допомогою приблизно 100 датчиків тиску, аналіз відносних похибок локалізації витоків і визначення об’ємів прихованих витоків води з напірних водопровідних мереж було здійснено з урахуванням фактичного технічного стану та ключових параметрів ефективності розподільчих водопровідних мереж в Україні станом на 2021 рік [9].

Частка втрат води крізь приховані витoki за різними експертними оцінками знаходиться в межах 50–90% від загальних втрат на витoki [70, 23]. Відтак мала (лише 3,25%) частка аварій, пов’язаних з прихованими витокami, зафіксована у Львові в 2020 році, найбільш ймовірно, не є репрезентабельною для оцінки співвідношення прихованих та відкритих витоків, а свідчить лише про їх наявність, але наразі достатньо низьку ефективність системи моніторингу та раннього виявлення витоків на львівському водопроводі.

1.2. Методи пошуку та локалізації прихованих витоків.

На сьогодні відомо багато методів, призначених для локалізації прихованих витоків з напірних водопровідних мереж, зокрема акустичний метод, метод кореляції, газовий метод, георадарний метод, SCADA системи [70, 26, 22]. Згадані вище методи можна умовно розділити на дистанційні, призначені для попереднього, наближеного визначення координат витoku, та польові методи, що дозволяють максимально точно встановити розташування витoku на місцевості. Основною проблемою польових методів є великі питомі витрати часу на виявлення витoku, що зумовлює як суттєві об'єми втрат води, так і значні затрати на саме виявлення витoku [53, 86].

Дистанційні методи локалізації витоків у мережах водопостачання дозволяють створювати централізовані схеми моніторингу навіть для великих мереж [77]. З іншого боку, стандартні похибки дистанційних методів у більшості випадків не дозволяють встановити місце витoku з точністю, достатньою для безпосереднього початку ремонтно-відновлювальних робіт [72, 5]. З врахуванням зазначених особливостей найбільш перспективними на сьогодні виглядають комбіновані методи, які передбачають застосування на першій стадії дистанційний метод для наближеної локалізації найбільших витоків, а на другій стадії – польовий метод для точного пошуку в колі наближеної локалізації.

Дослідження щодо виявлення та локалізації витоків безперервно розвивалися протягом десятиліть і були розроблені різні методи [70]. Основними методами є акустичний метод [55, 65] та метод хвилі негативного тиску [39, 76]. Однак ці методи можуть бути ефективними лише в певних ситуаціях. Наприклад, доведено, що акустичний метод є ефективним для металевих труб, але все ще існує багато труднощів у випадку пластикових трубопроводів [64]. Проаналізовані методи на основі перехідних процесів [82] привернули велику увагу до виявлення та локалізації витоків протягом останнього десятиліття, тому що ці методи потребують лише вимірювання тиску в тупиковій частині системи резервуар–труба–клапан

(RPV). Крім того, невеликий розмір витoku (менше 5% від швидкості потоку) можна точно виявити за допомогою цих методів завдяки тому факту, що, незважаючи на невеликий витік, він все ще може викликати очевидні зміни в перехідних хвилях тиску. Крім того, перехідні хвилі тиску показали себе задовільними для виявлення витоків, засмічень та інших дефектів трубопроводів [29].

У сучасних системах водопостачання пошук прихованих витоків є важливим етапом забезпечення ефективної та безперебійної роботи мережі. Існує низка методів, які застосовуються залежно від особливостей місцевості, типу трубопроводів, наявності доступу до обладнання та фінансових можливостей підприємства.

1.2.1. Пошук прихованих витоків методом визначення різниці температур та газовим методом

Термічний метод виявлення витоків у трубопроводі полягає у визначенні різниці температур на поверхні над трасою прокладання труб. Контактні термометри із занурюваними зондами, пірометрами та тепловізорами різних модифікацій використовуються для визначення температури. Метод заснований на відстеженні зміни температури поверхні. Перепади температур коливаються від частки градуса до десятків градусів.

Пристрої контролю температури - пірометри, мають високий ступінь швидкості і набагато простіші в експлуатації. Таким чином, діапазон швидкості – від часток секунди до 1–2 секунд. Пірометр дозволяє проводити безперервно вимірювання температури, при цьому зростає ефективність і точність управління. Внаслідок простоти у використанні та високої точності, цей спосіб є найкращий серед методів терморегулювання. Тепловізійний метод, враховуючи високу вартість обладнання та вимоги до кваліфікованих фахівців, використовується переважно для періодичних перевірок стану теплотраси під час профілактичного огляду [4, 8].

До менш поширених методів контролю відноситься газовий метод аналізу. Суть методу полягає в тому, що трубопровід заповнюється спеціальним газом, а місце пошкодження виявляється газоаналізаторами [6]. Манометричний метод використовується для контролю герметичності трубопроводів і клапанів. Існують методи виявлення витоків води за допомогою управління електромагнітним полем над поверхнею трубопроводів.

Ці методи дозволяють виявити перезволоження ґрунту під землею, але вони досить дорогі і все ще недосконалі [1,4,8].

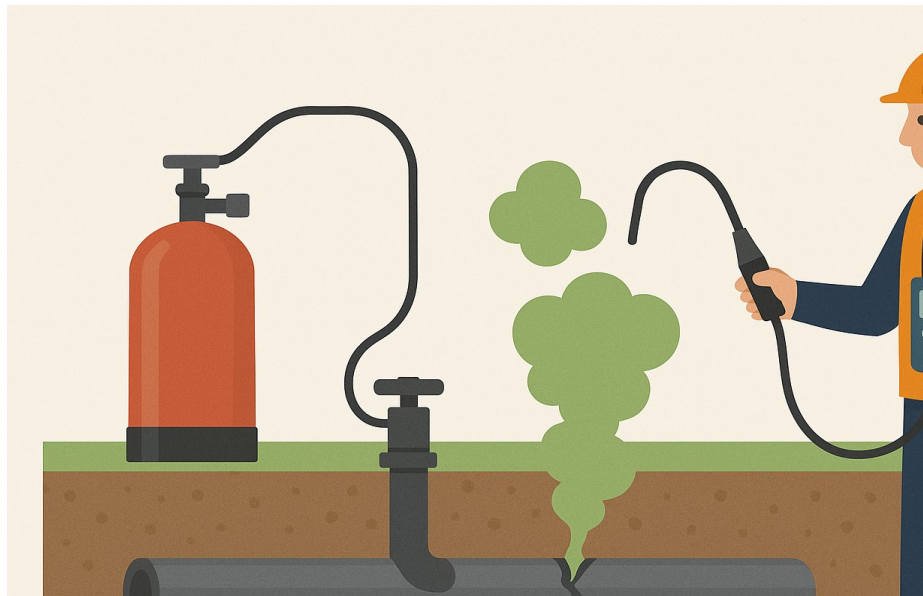


Рис.1.5 Газовий метод пошуку прихованих витоків води

1.2.2 Пошук прихованого витоку методом кореляції

Кореляційний метод виявлення прихованих витоків води є одним із найпоширеніших у світі способів виявлення прихованих витоків у трубопровідних системах. Його основна перевага полягає у можливості точно визначити місце витоку без розкриття ґрунту, що значно знижує витрати на аварійно-ремонтні роботи. Метод особливо ефективний у складних міських умовах, де традиційні акустичні прилади часто дають похибки через зовнішні перешкоди [1].

Суть методу полягає в тому, що при виникненні витoku вода, проходячи крізь отвір під тиском, створює характерний шум, який поширюється вздовж трубопроводу в обидва боки. На трубі в доступних точках (наприклад, у колодязях чи на пожежних гідрантах) встановлюються два датчики, які фіксують коливання. Ці датчики перетворюють механічні вібрації в електричні сигнали, які далі передаються у центральний обчислювальний блок пристрою. Якщо витік знаходиться на однаковій відстані від обох сенсорів, сигнали надходять одночасно. Якщо ж ближче до одного з них — виникає затримка сигналу.

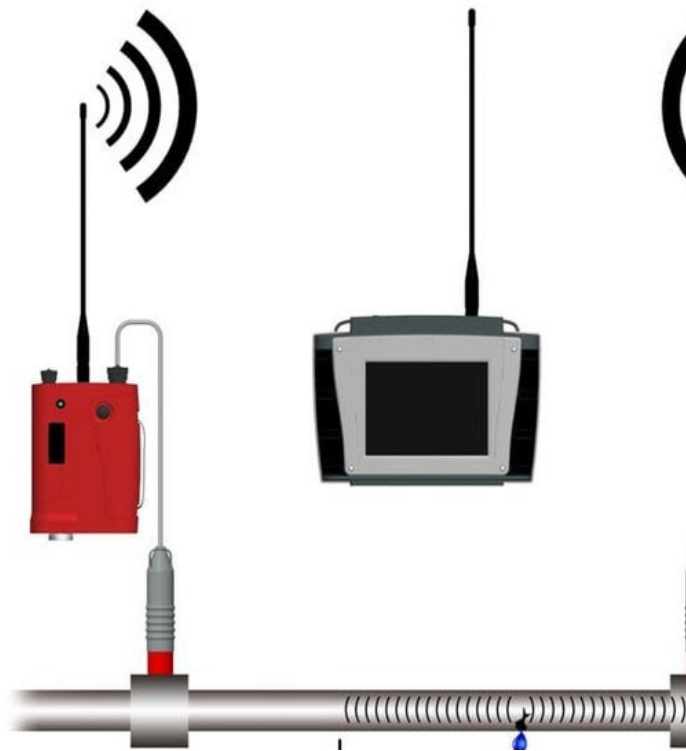


Рис. 1.6. Метод роботи кореляційного пристрою для пошуку прихованих витоків (адаптовано з [72])

$$L = \frac{D - ct_d}{2} \quad (1.5)$$

де L — відстань від сенсора до витoku, м;

D — відстань між сенсорами, м;

c — швидкість поширення звуку у воді, м/с;

t_d — час затримки, с.

На практиці оператор вводять тип труби (матеріал, діаметр), а пристрій автоматично підставляє табличне значення швидкості звуку. Однак, через різноманітність трубних матеріалів, зношення, з'єднання, ремонтні вставки, фактична швидкість звуку може відрізнятись від номінальної, що створює похибки в розрахунку. Саме тому при наближенні до витоків рекомендовано змінювати розташування сенсорів, щоб витік був розташований близько до середини між ними [42].

Визначення точного місця витоків у водопровідних мережах, вимагає насамперед, великого досвіду від персоналу щодо застосування приладових комплексів і методик застосування в різних практичних випадках. У багатьох випадках керівництво комунальних служб недооцінює важливість професійної підготовки персоналу щодо експлуатації обладнання для виявлення прихованих витоків, помилково вважаючи, що придбання приладів є достатньою умовою для ефективного застосування технологій.

Кореляційний метод є сучасним, ефективним та технічно обґрунтованим способом виявлення прихованих витоків води у розгалужених трубопроводних мережах. Його застосування дає змогу зменшити експлуатаційні витрати, мінімізувати втрати води та покращити оперативність реагування на аварійні ситуації. У поєднанні з цифровими технологіями аналізу сигналу та геоприв'язкою даних, цей метод є стандартом для міських водоканалів у всьому світі.

1.2.3 Пошук прихованих витоків методом акустичних сигналів

Метод акустичного виявлення витоків базується на фізичному принципі генерації звуку, який виникає під час витікання рідини під тиском крізь невеликий отвір у стінці трубопроводу. Шум витоків має хаотичний характер і ширококутовий частотний спектр. У трубах під тиском, особливо з металу, цей шум поширюється на значну відстань і може бути зареєстрований спеціалізованими сенсорами.

Вперше метод почали застосовувати ще в середині ХХ століття, однак сучасні технології значно розширили його можливості — зокрема, з появою

цифрових фільтрів, підсилювачів та аналізаторів спектру. Принцип роботи полягає в наступному:

Шум, що створюється виток, передається через стінки труби, ґрунт або воду. Акустичні сенсори, розміщені на арматурі (гідрантах, засувках) або безпосередньо на поверхні над трубою, вловлюють ці коливання. Потім сигнал посилюється, обробляється фільтрами для усунення фонового шуму (транспорт, робота насосів тощо), і відображається на екрані приладу або передається оператору через навушники.

Під час пошуку акустичними пристроями для пошуку прихованих витоків, шуми протікання води реєструються за допомогою датчика вібрації на ґрунті, над трубопроводом послідовно уздовж ділянки (з кроком 0,25...1,0 м), що діагностується. Координата витoku визначається по максимальному рівню вібросигналу в певній смузі частот. Оптимальна смуга частот залежить від типу трубопроводу і умов прокладення.

Оператор пересувається від точки до точки вздовж маршруту трубопроводу та порівнює рівень інтенсивності та частотний спектр шуму, що дає змогу наближено визначити місце витoku. Деякі сучасні прилади проводять частотний аналіз сигналу або дозволяють його запис для подальшого порівняння.

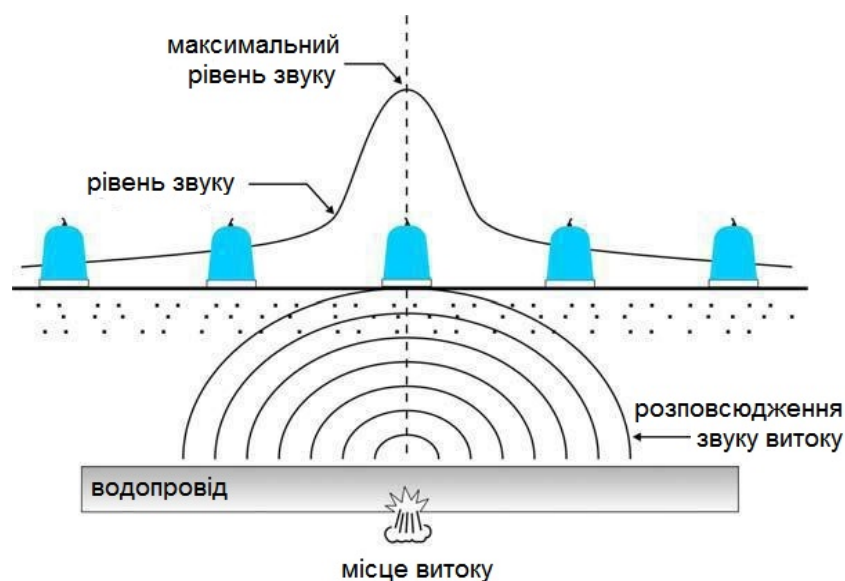


Рисунок 1.7. Розповсюдження акустичного сигналу від витoku води

Акустичні пристрої, що використовуються для виявлення прихованих витоків води, можна класифікувати за функціональністю та ступенем автоматизації. Найпростішими з них є акустичні стетоскопи, які дозволяють прослуховувати арматурні елементи та поверхню ґрунту над трубопроводом. Вони зазвичай складаються з підсилювача, навушників і мають можливість регулювання гучності. Такий тип пристроїв підходить для попередньої локалізації дефектів, однак не дозволяє точно визначити координати витoku.

Більш розвиненими є електронні або ґрунтові мікрофони, що дозволяють виявити точку з найбільшою інтенсивністю шуму на поверхні. Ці прилади аналізують віброакустичний сигнал, який проходить через ґрунт, і допомагають локалізувати місце пошкодження з точністю до 1 метра.

Аналізатори спектра – це пристрої, здатні візуалізувати частотний спектр шумів. Вони дозволяють виділити характерні піки, що відповідають акустичному "почерку" витoku, і, таким чином, підвищують точність діагностики, особливо в умовах міського шумового фону.

Найсучаснішими є смарт-мікрофони, які мають функції GPS, Bluetooth і можливість інтеграції з мобільними застосунками. Такі пристрої дозволяють не тільки виявляти витoki, а й формувати карти витоків, зберігати дані в базі, автоматично фіксувати результати діагностики з прив'язкою до координат.

Акустичний метод виявлення витоків є ефективним лише за дотримання низки технічних умов. Насамперед, у трубопроводі повинен підтримуватись тиск не нижче 2 атм, інакше шум, що утворюється внаслідок витoku, буде недостатнім для виявлення. Матеріал труби також має значення: сталеві, чавунні або мідні труби добре передають звукові хвилі, тоді як поліетиленові – значно гірше. Оптимальна глибина прокладання мережі для ефективної роботи мікрофонів становить до 2 метрів. За більшої глибини потрібен доступ до арматури або колодязів. Тип покриття також впливає на чутливість – асфальт і бетон краще проводять вібрації, ніж пухкий ґрунт чи газон.

До переваг акустичного способу належить насамперед висока мобільність та простота використання: прилади не потребують врізки у

трубопровід або зупинки водопостачання. Вони також мають низьку вартість порівняно з іншими методами діагностики (кореляційним, ультразвуковим, інфрачервоним). Такий підхід дозволяє проводити періодичні обстеження протяжних ділянок мережі без порушення її роботи. Метод є неінвазивним, що важливо при обстеженні систем у густозаселених районах.

Попри свої переваги, метод має низку обмежень. Найбільше серед них — чутливість до зовнішніх шумів: робота транспорту, насосного обладнання, витрата води на інших ділянках системи можуть спотворювати результат. Тип матеріалу труб також відіграє критичну роль: у ПЕ трубах звук затухає значно швидше. Ще один недолік — суб'єктивність аналізу: якість діагностики значною мірою залежить від досвіду оператора. Цікаво, що великі витіки, всупереч очікуванням, іноді генерують менше шуму, ніж дрібні — через зниження тиску в місці прориву.

1.2.4. Гідравлічні методи локалізації витоків води

Аналізи гідравлічних методів виявлення та локалізації прихованих витоків подані у спеціалізованих оглядах [62, 84]. До гідравлічних методів належить аналіз перехідних режимів потоку [29, 25, 60], а також стохастичні гідравлічні методи [80]. Гідравлічні принципи також використовуються в різноманітних комп'ютерних методах [74], включаючи використання штучних нейронних мереж для аналізу взаємопов'язаних змін тиску та витрат у характерних ділянках розподільчої мережі в різних режимах її роботи [49, 83]. Системи безперервного інтегрованого моніторингу параметрів тиску та витрати, що використовують сучасні інформаційні технології, є сучасними ефективними засобами виявлення прихованих витоків води з мереж водопостачання. Обов'язковим елементом таких систем є гідравлічна модель, що аналізує зміни основних гідравлічних параметрів мережі, включаючи надлишковий тиск у характерних вузлах і об'ємні витрати в ключових зонах.

Загалом, ідея ретельного дослідження трендів тиску є загальною рисою багатьох методів виявлення прихованих витоків [60]. Це дослідження стосується використання методів на основі тестування перехідних процесів для виявлення негерметичності довгих магістральних ліній. У роботі проаналізовано результати двох серій перехідних випробувань, виконаних на реальному діючому водопроводі. З огляду на складність досліджуваного трубопроводу, який складається з декількох патрубків, на обох кінцевих ділянках, перехідні процеси були спричинені відключенням насоса та портативного пристрою для створення хвиль тиску. Запропонована процедура випробувань дозволяє подолати негативний вплив зміни початкових і граничних умов. Успіх одночасної локалізації двох витоків, виявлених з високою точністю під час досліджень, підтверджує потенціал методу тестування перехідних процесів для виявлення прихованих витоків у реальних водопровідних мережах [60].

Аналіз попередніх досліджень свідчить про відсутність системних результатів щодо точності методу гідравлічного градієнта, а також оцінки ймовірностей локалізації прихованих витоків за цим методом з урахуванням потенційної ймовірності наявності кількох витоків на ділянці мережі.

Майже століття тому Баббіт (1920) провів огляд існуючих на той час підходів до виявлення витоків, описавши методи, починаючи від простого спостереження за затопленими вулицями та аномальним ростом рослинності до ін'єкцій хімічних індикаторів і акустичних методів із використанням цілого ряду пристроїв від залізних прутів до стетоскопа, як апарату. Серед перерахованих стратегій він згадує виявлення витоків за допомогою ослаблених перехідних хвиль тиску, використовуючи дію скидання тиску, яку забезпечують витoki під час стрибків. Цей факт призводить до методу визначення місця та величини витоків. Оскільки проблема перехідного потоку в трубах є майже лінійною, розв'язок керівних рівнянь можна виразити через ряд Фур'є. Усі компоненти Фур'є амортизуються рівномірно через постійне тертя труби, але кожен компонент гаситься по-різному за

наявності витoku. Таким чином, загальне демпфування, викликане витокom, можна розділити на дві частини. Величина демпфування вказує на розмір витoku, тоді як різні коефіцієнти демпфування різних компонентів Фур'є використовуються для визначення місця витoku. Цей метод не вимагає точного визначення та моделювання граничних умов і перехідних процесів у трубопроводі. Цей метод дозволяє успішно виявляти місцезнаходження та кількісно визначати витрату витoku для свищів розміром не менше як 0,1% від площі поперечного перерізу трубопроводу.

1.2.4.1 Пошук прихованих витоків методом гідравлічного градієнта.

Найпростішим гідравлічним методом локалізації одиночного прихованого витoku на ділянці напірної мережі є метод гідравлічного градієнта, розроблений ще на початку XX століття [21], та детально проаналізований та поглиблений у працях [29,60].

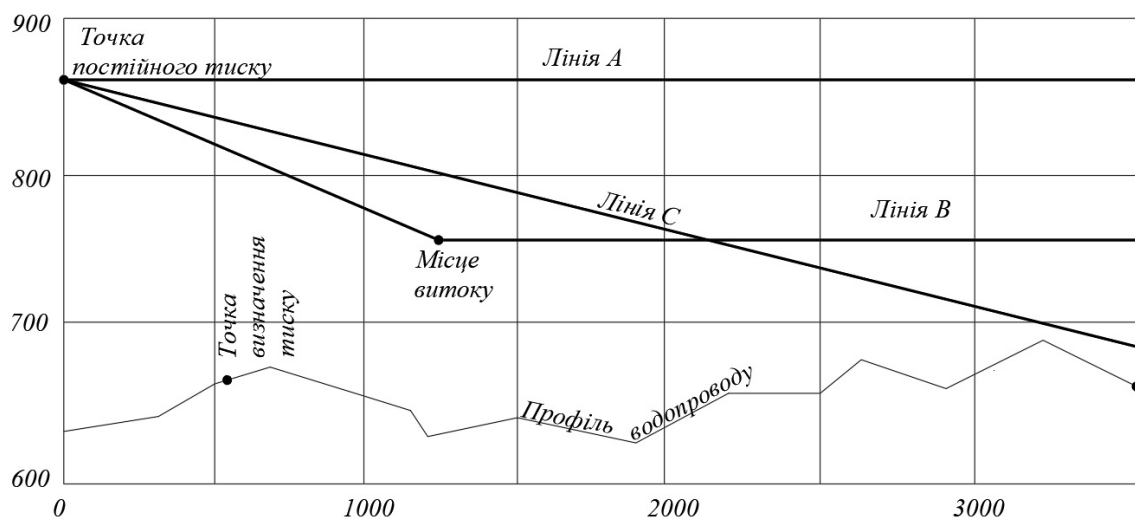


Рис. 1.14. Типова діаграма локалізації витoku на ділянці трубопроводу методом гідравлічного градієнта за Баббітом [21]

Ідея методу гідравлічного градієнта, запропонованого Баббітом [21], полягає у побудові ліній повного (гідравлічного) напору на ділянці АВ за даними натурного вимірювання тиску в кінцевих вузлах А і В, а також у деякій проміжній точці С (рис. 1.14). Метод вимагає наявності запірно-

регулювальної арматури у вузах А і В (відповідно, засувки 3.1 та 3.2), а також відсутності бічних відгалужень на ділянці АВ, або ж можливості їх повного перекриття за наявності.

У випадку відкритих засувки 3.1 та 3.2 та відсутності витоків та бічних відгалужень, за умови що діаметр, матеріал, вік та еквівалентна шорсткість трубопроводу є однаковими по довжині ділянки АВ, лінія повного напору має вигляд прямої лінії 1 з постійним на всій ділянці гідравлічним градієнтом I_{z1} .

За відкритої засувки 3.1 та закритої засувки 3.2 при відсутності витоків п'єзометричні напори в точках А і В будуть однаковими, а напірна лінія 2 – строго горизонтальною, тобто гідравлічний похил $I_{z2} = 0$. У випадку, якщо на ділянці АВ має один або декілька витоків, повні напори H_A і H_B у вузлах А та В відрізнятимуться. Таким чином, фіксація різних гідравлічних напорів у крайніх вузлах ділянки АВ за відкритої засувки 3.1 та закритої 3.2 є свідченням наявності на ділянці одного або кількох витоків. У випадку наявності лише одного витoku, його можна локалізувати з використанням методу гідравлічного градієнта. Для цього вводиться припущення, що одиночний прихований витік має місце у деякій довільній т. D (рис. 1). Для визначення координати витoku L_{leak} необхідно визначити гідравлічний напір ще в одній проміжній точці С, причому точка С має бути ближчою до вузла А, ніж точка витoku D.

Визначення повного напору у точці С (H_C) дає можливість знайти гідравлічний градієнт I_{z3} . Точка витoku (т. D) знаходиться на перетині лінії повного напору, проведеної через точки з напорами H_A та H_C , до перетину з горизонтальною лінією, що відповідає напору H_B (лінія 3 на рис. 1.14).

У таблиці 1.6 представлено основні методи виявлення прихованих витоків, які знаходять практичне застосування у водопровідних системах.

Таблиця 1.6 – Порівняльна характеристика методів виявлення прихованих витоків води

Назва методу	Суть методу	Переваги	Недоліки
Метод визначення різниці температур	Вимірювання температури ґрунту або покриття для виявлення аномалій	Не потребує розкопок, можливість локалізації з поверхні	Чутливість до зовнішніх температурних змін
Газовий метод	Введення інертного газу в трубопровід і виявлення витoku газоаналізатором	Висока точність локалізації, особливо на складних ділянках	Потребує спеціального обладнання та герметизації ділянки мережі
Метод кореляції	Аналіз часу проходження шуму між двома датчиками	Ефективний на металевих та пластикових трубах, висока точність	Вимагає доступу до трубопроводу з двох боків
Акустичний метод	Виявлення витoku за характерними шумами	Простота застосування, мобільність обладнання	Складність розпізнавання шуму у шумному середовищі
Метод гідравлічного градієнта	Аналіз зміни тиску/потoku на ділянках мережі	Дає змогу виявити витік на довгих ділянках	Не дозволяє точно локалізувати місце витoku без додаткових методів

Порівняльна характеристика показує, що методи виявлення прихованих витоків води відрізняються за точністю, складністю застосування та вимогами до обладнання. Методи температурного контролю та акустичного аналізу є простими у використанні, проте менш точними в складних умовах. Газовий метод та метод кореляції забезпечують високу точність локалізації витоків, але потребують спеціалізованого обладнання і доступу до трубопроводу. Метод гідравлічного градієнта дозволяє виявляти витoki на довгих ділянках з урахуванням переваг і недоліків, вибір оптимального способу залежить від конкретних умов обстеження, типу трубопроводу та наявних технічних можливостей.

1.3. Системи, прилади та обладнання для виявлення прихованих витоків

1.3.1. Системи виявлення прихованих витоків

Аналіз наукових джерел та прикладних робіт з виявлення витоків дозволяє виділити дві основні категорії систем для виявлення витоків: системи статичного (або стаціонарного) та динамічного (або мобільного) виявлення витоків. Незважаючи на те, що кожна система сама по собі здатна ідентифікувати та локалізувати витoki, нерідко ефективним є поєднання систем різних категорій [34].

Реалізація систем постійного інтегрованого моніторингу для мереж водопостачання з використанням сучасних ІТ-технологій є дійсно ключовою для вирішення проблеми прихованих витоків і зменшення втрат води. Було розроблено кілька систем моніторингу для виявлення та оцінки обсягу витраченої води, які мають певні перевагами й недоліками:

Акустичні системи виявлення витоків: ці системи використовують датчики для виявлення звукових аномалій у мережі трубопроводів. Коли вода виходить з витоку, вона створює характерні акустичні сигнали, які можна виявити за допомогою цих датчиків. Однією з переваг цього методу є його здатність точно визначити місцезнаходження витоків. Проте він може мати обмеження у виявленні витоків у великих трубопроводах або в шумних середовищах.

Системи моніторингу потоку: Ці системи відстежують потік води через мережу трубопроводів. Раптові зниження об'єму потоку можуть свідчити про наявність витоку. Системи моніторингу потоку ефективні у виявленні витоків, що призводять до значних втрат води. Проте вони можуть бути недостатньо чутливі до виявлення невеликих витоків або витоків у зонах з низьким споживанням у мережі.

Системи моніторингу тиску: Шляхом моніторингу рівнів тиску в різних точках мережі можна виявити аномалії, які можуть свідчити про наявність витоків. Раптове зниження тиску може свідчити про витік поблизу датчика

тиску. Системи моніторингу тиску ефективні для виявлення витоків у системах з високим тиском. Проте вони можуть бути не підходящими для виявлення витоків у системах з гравітаційною подачею, де варіації тиску мінімальні.

Супутникові системи моніторингу: Ці системи використовують супутникові знімки та технології дистанційного зондування для виявлення змін у рівнях вологості поверхні або в збільшенні рівня рослинності, які можуть свідчити про підземні витoki. Супутникові системи моніторингу мають перевагу покриття великих географічних областей і можуть бути особливо корисними для виявлення витоків у віддалених або недоступних місцях. Проте вони можуть мати обмеження у виявленні невеликих витоків або витоків у міських зонах з густою рослинністю або інфраструктурою.

Статичні системи виявлення витоків – це системи, робота яких базується на показах датчиків, розміщених безпосередньо на водопровідній мережі та на запірно-регулювальних пристроях, які періодично передають вхідні дані до диспетчерської служби, яка проводить управління мережею. Ці дані можна використовувати для ідентифікації, локалізації та точного визначення витоків. До найпоширеніших статичних систем виявлення витоків належать системи ASQ, FIDO, WLM та PermaNET.

ASQ-система дозволяє збирати, аналізувати та візуалізувати результати моніторингу. Принцип роботи базується на неперервному автоматичному акустичному моніторингу параметрів напірних потоків у мережі водопостачання за допомогою спеціальних датчиків, розміщених на елементах водопровідної мережі з регулярним інтервалом 300–500 м для сталевих та полівінілхлоридних (ПВХ) труб, або з інтервалом 300–400 м для поліетиленових (ПЕ) труб. Датчики вимірюють рівень шумів і надсилають відповідні дані в хмарне сховище. Система аналізує картину шумів, фільтрує її та вказує на можливі місця витоків води. Похибка визначення місця витoku системою ASQ не перевищує 2% відповідної відстані між сусідніми датчиками [20].



Рис. 1.15 ASQ-система виявлення прихованих витоків води [20].

Система FIDO для виявлення витоків та визначення їх розміру використовує штучні нейронні мережі. Матеріальною основою FIDO-системи також є мережа датчиків, встановлених на водопровідній мережі, які дозволяють регулярно, як правило, кожні 15 хвилин, виконувати моніторинг параметрів мережі. Ядром системи FIDO є спеціальний гібридний алгоритм розрахунку, на основі диференціального аналізу, який аналізує вібрацію частоти та хвильові функції, що зберігаються у файлах даних, отриманих від датчиків. Алгоритм виявляє та порівнює незначні зміни в звуках, вібрації, швидкості та турбулентності потоку, на підставі чого система встановлює, чи є витік, а також його ймовірний розмір та розташування. [38].

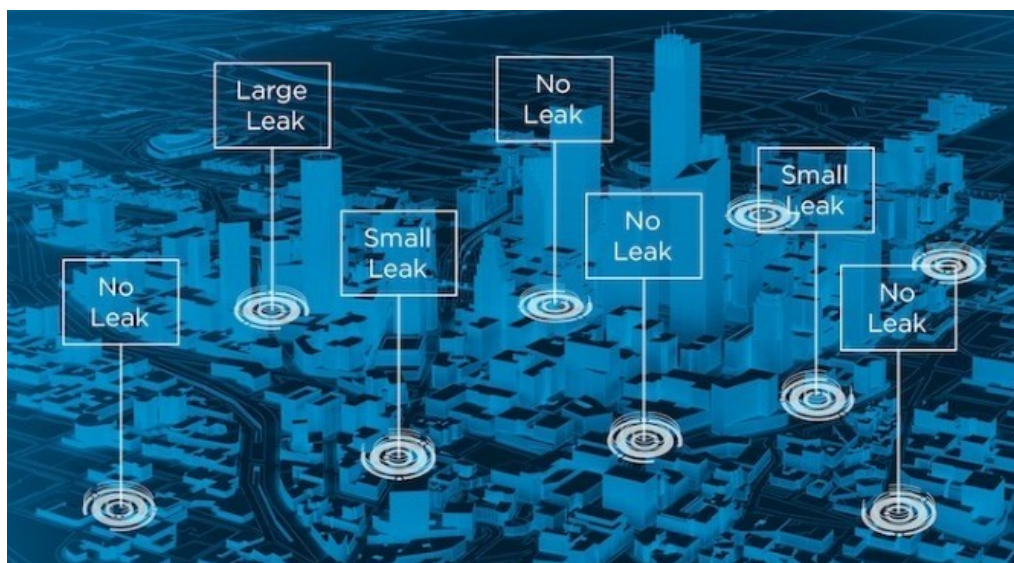


Рис. 1.16. Fido-система виявлення прихованих витоків води [38].

В основу системи WLM входять високочутливі комбіновані датчики, що одночасно реєструють об'ємну витрату і швидкість потоку разом з напрямком потоку, тиском, інтенсивністю шумів і температурою води. Система включає в себе програмне забезпечення, що керує датчиками, обчисленнями та дистанційним керуванням та передачею даних вимірювань. Вимірювання проводяться постійно, з особливим акцентом на нічні години, коли споживання води найменше. Висока точність і широкі діапазони вимірювань ($v = 0,01\text{--}9,999$ м/с з роздільною здатністю 0,001 м/с; тиск 0–16 і навіть 30 бар; інтенсивність шуму 8–3500 Гц з посиленням 5000Гц) дозволяють виявити навіть найменші витіки води. Спеціальне програмне забезпечення AQUALYS аналізує вимірювання даних і у співпраці з ГІС, дозволяє чітко представити результати на схемі мережі [58].

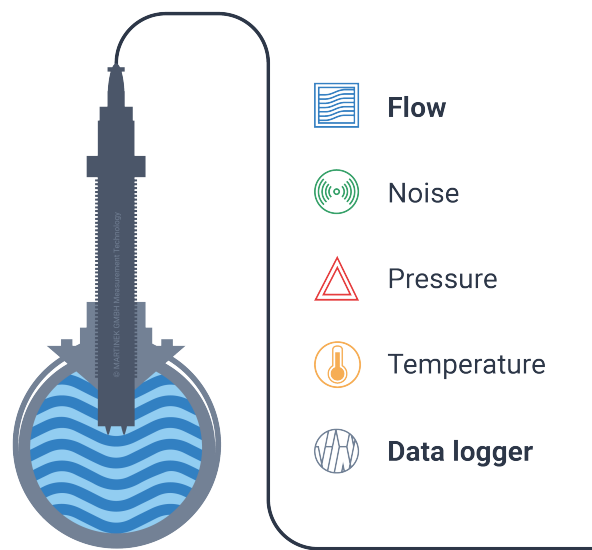


Рис. 1.17 WLM-система виявлення прихованих витоків води [58].

Система PermaNET, як і попередні системи, базується на мережі акустичних датчиків та телеметричних модемів. Датчики шуму встановлені на мережевих трубопроводах з інтервалом 200–400 м. Кожен пристрій має певне GPS положення, завдяки чому його легко знайти на картах. Встановлені модеми дозволяють передавати дані через GPRS в режимі реального часу, що дозволяє швидко виявити витік [88].



Рис. 1.18. Система PermaNET для виявлення прихованих витоків води [88]

Динамічні системи виявлення витоків – це системи, які покладаються на переміщення пристроїв виявлення до зони підозрілого витоків для проведення дослідження. Тому вони спочатку покладаються на підозру про наявний витік. Іншим підходом є проведення регулярних обстежень у місцях для якнайшвидшого виявлення витоків. Ці системи можуть підтвердити наявність витоків і негайно локалізувати їх. Також можна використовувати системи динамічного виявлення для виявлення витоків шляхом регулярного обстеження чутливих зон. Навіть тоді, системи динамічного виявлення витоків можуть точно визначити місце витоків після його ідентифікації.

Динамічними системи – це, по суті, ті ж самі акустичні датчики для вимірювання шуму в мережі водопостачання, які встановлюються тимчасово в місцях, де є підозра прихованого витоків води. Також водоканали використовують такі датчики для перевірки всієї системи водопостачання міста, встановлюючи їх по чергові, охоплюючи окремі зони, квартали, чи вулиці. Таким чином протягом якогось періоду перевіряється вся система водопостачання, тому динамічні системи виявлення витоків вимагають мобілізації групи перевірки витоків, яка доставляє пристрої до підозрюваного місця витоків, щоб виконати перевірку та підтвердити або зняти підозру. Такі

системи включають рухомі інфрачервоні автомобілі, рухомі наземні радіолокаційні машини та гідрофонні системи [34].

Основна відмінність між двома класами полягає в тому, що статичні системи виявлення витоків можуть інформувати про існування витоків майже миттєво, тоді як системи динамічного виявлення витоків повинні мати інформацію про можливість витоків, щоб їх можна було використати для дослідження. З іншого боку, динамічні системи виявлення витоків можуть майже миттєво визначити точне місце витоків за ідеальних робочих умов, тоді як статичні системи виявлення витоків забезпечать розташування в межах певної області, і вони також більш схильні до помилкових тривог. Ці два класи охоплюють широкий спектр технологій для забезпечення точної системи виявлення витоків, але технології не обмежуються одним класом. Наприклад, акустичні технології, зокрема шумореєстратори, можуть бути динамічними і періодично переміщувати з одного місця в інше для виявлення витоків. Через неточності, та помилкові тривоги під час використання статичних систем для виявлення витоків, водоканали все ще покладаються на динамічне виявлення витоків, щоб дати остаточну відповідь у випадках сумніву [34].

Доцільно використовувати динамічну чи статичну систему виявлення витоків для виявлення попереднього місця витоків, після чого використовувати спеціальні мобільні прилади для визначення точного місця витоків такі як корелятори, гідрофони чи інші акустичні прилади, що допоможе пришвидшити час локалізації витоків, щоб запобігти суттєвим втратам при довготривалому витокі води.

Таблиця 1.7 Порівняльний аналіз сучасних систем для пошуку прихованих витоків води

Якісні параметри систем для пошуку прихованих витоків	ASQ	Fido	WLM	Perma NET	Smart Flow
Автоматичний аналіз даних і відображення тривоги	+	+	+	+	+
Висока точність визначення місця	+	+	+	+	

витоку					
Спеціальний додаток для мобільних пристроїв	+			+	+
Автоматична передача даних через GSM	+		+	+	
Можливість інтеграції ГІС	+		+		+
Можливість виявлення невеликих витоків		+	+		
Можливість контролювати декілька параметрів одночасно			+		+
Можливість дистанційного налаштування параметрів реєстратора			+	+	
Адаптивна фільтрація перешкод і шумів	+	+			
Використання штучного інтелекту	+	+			

Ці методи дозволяють не тільки виявляти та локалізувати приховані витoki, але й контролювати роботу водопровідної мережі в цілому. Системи дозволяють збирати та зберігати дані від вимірювальних приладів та швидко оцінювати зміни параметрів мережі, наприклад, збільшення витрати води та перепадів тиску, що, в свою чергу, дозволяє мінімізувати час реакції на витoki, які виникають у мережі, та швидше їх ліквідовувати.

1.3.2. Пристрої та обладнання для виявлення витоків

Виявлення місць пошкодження трубопроводів є ключовим елементом забезпечення надійності та ефективності систем водопостачання. Враховуючи, що більшість таких комунікацій знаходяться під землею і складаються з трубопроводів різного складу, діаметра, стану, використання спеціальних технічних засобів є необхідним для досягнення цієї мети. Пристрої, призначені для пошуку прихованих тріщини, отворів в стінках трубопроводів, резервуарів. Пристрої для виявлення витоків називаються детекторами витоків. Вони дозволяють визначити місце витоку з високою точністю незалежно від типу ґрунту, глибини трубопроводу, температури рідини, тиску і інших умов експлуатації.

Принцип дії детекторів витоків базується на виявленні викидів рідини через пошкоджену ділянку в навколишнє середовище під впливом високих

тисків. В даний час існує ряд методів для виявлення витоків води з трубопроводів, але жоден не є уніфікованим та ефективним, який працює у всіх умовах. Акустичний метод став найбільшим поширеним.

Пристрої, що використовують цей метод, поділено на три категорії [14,79].

До першої категорії належать пристрої, які використовують контроль без фільтрації. Спектр звукового сигналу води, що витікає з пошкодженого трубопроводу залежить від тиску в трубопроводі, а також від розміру пошкодження, і знаходиться в діапазон від 100 Гц до 3 кГц. Пристрої цього типу хороші на практиці у сільській місцевості, далекій від дороги. Робота пристроїв цього класу є базується лише на чутливості датчика, яка змінюється від 80 мВ / г до 500 мВ / г.

До другої категорії належать пристрої з електронною фільтрацією вхідного сигналу. Головне завдання фільтра - витягти корисний сигнал з сильного шуму при використанні в міських умовах. Головною характеристикою є ступінь фільтрації: чим вище він, тим вище ефективність очищення перешкод. Пристрої цієї категорії також характеризуються наявністю датчиків для різних поверхонь: трава, земля, сніг, асфальт, ґрунт.

До третьої категорії належать детектори витоків з функцією корелятора. Ось такі пристрої дозволяють оцінювати відстані до пошкодження завдяки різниці між шумом значення в залежності від відстані до місця пошкодження. Цей метод використовує в основному детектори витоків з індикатором, що візуально відображає рівень шуму датчиком спеціалізованого типу.

1.3.2.1.Огляд сучасних акустичних пристроїв для виявлення прихованих витоків

Серед сучасних приладів для виявлення прихованих витоків методом кореляції особливої уваги заслуговують моделі, що виробляються компаніями з Швейцарії, Великої Британії та Німеччини. Ці пристрої

забезпечують високу точність локалізації завдяки чутливим сенсорам, широкому частотному діапазону та можливості бездротової передачі даних. Нижче подано опис трьох найбільш поширених моделей.

GUTERMANN ZONESCAN 820 (Швейцарія) — це високоточний бездротовий корелятор, що дозволяє виявляти витoki на відстані до 300 метрів між датчиками. Пристрій ефективний для трубопроводів глибиною до 3 метрів і підтримує широкий частотний спектр — від 1 до 5000 Гц. Він сумісний із металевими та поліетиленовими трубами, що робить його універсальним для різних умов. Вартість приладу стартує від 10 000 євро залежно від комплектації.



Рис. 1.19. Кореляційний течешукач GUTERMANN ZONESCAN 820 (Швейцарія),

Primayer Enigma3m (Велика Британія) — ще один представник кореляційних приладів нового покоління. Його перевагою є передача даних через GSM/GPRS, що забезпечує віддалений моніторинг без необхідності присутності оператора на місці. Дальність дії до 300 метрів між датчиками, ефективна глибина до 3 м. Ціновий діапазон становить приблизно 8 000–10 000 євро.



Рис. 1.20. Кореляційний течешукач Primayer Enigma3m

Sewerin SeCorr® 08 (Німеччина) — німецька система для точного виявлення витоків з покращеною дальністю дії — до 350 м. Вона працює в діапазоні 1–3000 Гц і сумісна з трубами різного матеріалу, включаючи ПЕ. Завдяки своїй універсальності та точності, цей прилад широко використовується у європейських країнах. Його вартість коливається в межах 6 000–8 000 євро.



Рис. 1.21. Кореляційний течешукач Sewerin SeCorr® 08

У таблиці подано ключові характеристики трьох популярних моделей, що є представниками провідних міжнародних брендів.

Таблиця 1.8 Порівняльна характеристика трьох моделей кореляторів для виявлення прихованих витоків води

Модель	Країна	Дальність пошуку, м	Глибина виявлення, м	Чутливість, Гц	Орієнтовна ціна, євро
Guterman Zonescan 820	Швейцарія	до 300	до 3	1–5000	від 10 000
Primayer Enigma3m	Велика Британія	до 300	до 3	1–5000	8 000 – 10 000
Sewerin SeCorr® 08	Німеччина	до 350	до 3,5	1–3000	6 000 – 8 000

Акустичний метод виявлення витоків найчастіше використовується на початковому етапі обстеження трубопроводних мереж або для підтвердження витоків, зафіксованих логгерами чи кореляторами. Він є невід’ємною складовою комплексної діагностики, яка включає також кореляційний, гідравлічний та трасувальний методи. У практиці водоканалів та спеціалізованих сервісних компаній активно застосовуються різні акустичні пристрої, які відрізняються функціональністю, технічними характеристиками та призначенням.

Один із таких приладів — термо-акустичний течешукач А-10ТЗ. Це універсальний пристрій, що поєднує в собі функції акустичного детектора і безконтактного теплового вимірювача. Його частотний діапазон становить від 47 до 3500 Гц. Прилад має чотири вбудовані фільтри (А0, А, В, С) для очищення сигналу, автоматичне регулювання підсилення в межах 60 дБ, графічний дисплей із роздільною здатністю 64×128 точок. Тепловий канал забезпечує точність вимірювання до $\pm 0,5$ °С. Живлення здійснюється від акумулятора напругою 7,4 В і ємністю 4000 мА·год, що забезпечує до 20 годин автономної роботи. Вага блоку оператора становить 1,0 кг, а повного комплекту – 6,2 кг.



Рисунок 1.22. – Термо-акустичний течешукач А-10ТЗ у повній комплектації

Другим прикладом є акустичний течешукач HYDROLUX HL-500. Це прилад німецького виробництва, призначений для роботи в умовах підвищеного міського шуму. Його частотний діапазон охоплює спектр від 0 до 4000 Гц. Система цифрової фільтрації дозволяє обирати частоти зрізу, зокрема 70, 106 і 160 Гц. Прилад оснащений великим дисплеєм з підсвічуванням, проте не має теплового каналу. Живлення здійснюється за допомогою батарей (тип не уточнюється). Модифікація HL-500 H2 дозволяє також працювати в режимі виявлення водню. Прилад підходить для діагностики як металевих, так і поліетиленових труб.



Рисунок 1.23. – Акустичний течешукач HYDROLUX HL-500 з мікрофоном та дисплеєм

Третім який має широке використання пристроєм є акустичний мікрофон GUTERMANN AQUASCOPE-3. Цей прилад вирізняється легкістю, мобільністю та високою точністю. Його робочий частотний діапазон становить від 1 до 5000 Гц. Він має цифрову систему фільтрації з можливістю тонкого налаштування. Тепловий канал відсутній, але прилад оснащений кольоровим дисплеєм, що відображає спектр шумів у реальному часі. Для живлення використовуються чотири батарейки типу AA по 1,5 В, що дозволяє приладу працювати автономно до 60 годин. Завдяки можливості збереження даних і підключення навушників, AQUASCOPE-3 є зручним інструментом для швидкої локалізації витоків у міських умовах.



Рисунок 1.24. Акустичний мікрофон GUTERMANN AQUASCOPE-3

Усі розглянуті акустичні пристрої мають свої переваги й обмеження, які зумовлені технічними характеристиками, типом сенсорів, джерелом живлення та функціональними можливостями. Для зручності аналізу та вибору оптимального варіанту в конкретних умовах експлуатації, у таблиці нижче наведено порівняльну характеристику трьох моделей акустичних течешукачів, які найбільш часто використовуються у практиці водоканалів та сервісних підприємств.

Таблиця 1.9 Порівняльна характеристика трьох моделей акустичних приладів для виявлення прихованих витоків води.

Параметр	Термо-акустичний течошукач А-10ТЗ	Акустичний течошукач HYDROLUX HL-500	Акустичний мікрофон GUTERMANN AQUASCOPE-3
Діапазон частот, Гц	47–3500	0–4000	1–5000
Фільтрація шумів	4 фільтри (А0, А, В, С)	Фільтри з частотами зрізу: 70, 106, 160 Гц	Плавне налаштування, вузькі пропускні інтервали
Теплометричний аналіз	Так	Ні	Ні
Автоматичне регулювання підсилення	60 дБ	Немає даних	Немає даних
Дисплей	Графічний ЖК, 64×128 точок	Немає даних	ЖК з підсвічуванням
Живлення	Літій-полімерний акумулятор, 7,4 В, 4000 мА·год	Батареї (тип не вказано)	4 стандартні лужні батареї 1,5 В
Час роботи без підзарядки, год	До 20	Немає даних	До 60
Вага, кг	Блок оператора: 1,0; повний комплект: 6,2	Немає даних	Немає даних

1.4. Мета роботи та задачі досліджень

Актуальною проблемою водопостачання в світі є проблема прихованих витоків води з водогонів та напірних розподільних мереж. Приховані витoki становлять суттєву частку від загальних втрат води в системах водопостачання їх величина напряду залежить від віку та технічного стану трубопроводів. На локалізацію прихованих витоків підприємства, що експлуатують системи водопостачання, витрачають багато часу та коштів, у більшості випадків необхідне застосування спеціальних приладів для пошуку. Контрольоване зниження тиску в зонах із високими втратами є одним з найефективніших методів зменшення втрат води.

Комплексний підхід до вирішення питання виявлення витоків води з водопровідних мереж населених пунктів України із використанням спеціалізованого обладнання забезпечить оперативне виявлення аварійних ділянок, що сприятиме зменшенню експлуатаційних витрат у секторі водопостачання.

Системи постійного інтегрованого моніторингу на базі сучасних ІТ-технологій відіграють ключову роль у виявленні та зменшенні прихованих витоків. Кожна з них має свої сильні й слабкі сторони, тому для досягнення максимальної ефективності доцільним є комбінування декількох рішень. Для подальшого підвищення ефективності необхідне постійне проведення наукових досліджень та розробок у цій сфері.

Одним із найефективніших методів зменшення втрат води є контрольоване зниження тиску у зонах із високим рівнем витрат. Ефективне управління втратами води базується на комплексних заходах: впровадженні зонування мереж (DMA-зон), активному контролі й стабілізації тиску, локальному моніторингу витрат. Ці стратегії дозволяють не лише оперативно виявляти витoki, але й мінімізувати їх наслідки, знижуючи аварійність і витрати на ремонт.

Відомий спосіб локалізації прихованих витоків з використанням методу гідравлічного градієнта є відносно ефективним, як простий і доступний

інструментальний спосіб локалізації витоків, особливо на завершальному етапі, після наближеної локалізації проблемної ділянки за допомогою дистанційного моніторингу. Основним обмеженням методу є необхідність вимірювання тиску в проміжній точці, для чого потрібно проводити додаткові допоміжні розкопування трубопроводу по довжині ділянки.

Враховуючи наведені вище недоліки існуючих систем виявлення та локалізації прихованих витоків, зокрема методу гідравлічного градієнта та інших гідравлічно-базованих методів, сформульовано мету та задачі дисертаційного дослідження.

Метою дисертаційної роботи є розробка статистично-гідравлічного методу локалізації прихованих витоків води та/або несанкціонованих відборів води з магістральних водоводів та ліній зонних водопровідних мереж, визначення приведених похибок, умов та діапазону застосування методу.

Об'єктом досліджень у роботі є потоки води в напірних водоводах та на лініях зонних водопровідних мереж за наявності витоків та/або несанкціонованих відборів води.

Предмет досліджень – гідравлічно-базовані методи виявлення та локалізації прихованих витоків з напірних водопровідних мереж.

Відповідно до мети дисертаційної роботи сформульовано наступні задачі дослідження:

- порівняльний аналіз відомих методів локалізації витоків з напірних водопровідних мереж;
- виконати аналіз похибок локалізації витоків за методом гідравлічного градієнта;
- розробка статистично-гідравлічного методу локалізації прихованих витоків води та/або несанкціонованих відборів води з напірних водопровідних мереж;
- виконати чисельне моделювання похибок локалізації витоків для основних вхідних параметрів, у т.ч. тиску в мережі, діаметра трубопроводу,

площі отвору, безрозмірної величини витоку та відносного розташування витоку на ділянці;

- розробити модель прогнозування багатоаварійності на ділянці водопровідної мережі;

- виконати натурну експериментальну верифікацію ефективності статистично-гідравлічного методу локалізації витоків;

- оцінити техніко-економічну ефективність запропонованого методу статистично-гідравлічного методу локалізації прихованих витоків.

Розділ 2

МЕТОДИКА ВИКОНАННЯ ДИСЕРТАЦІЙНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Планування експериментів

2.1.1 Мета та підхід до планування експерименту

Метою чисельного експерименту є оцінка впливу основних гідродинамічних факторів на точність визначення координати витоку в трубопроводі.

Для цього було розроблено план експерименту, який дозволяє оцінити взаємозв'язки між вхідними параметрами та функцією відгуку.

Враховуючи складність фізичних процесів, дослідження проведено автоматизовано у Microsoft Excel, де було реалізовано алгоритми для розрахунку та статистичного аналізу отриманих даних. Це дозволило мінімізувати людський фактор і підвищити точність результатів.

2.1.2 Вибір факторів експерименту

Для аналізу обрано 4 ключові фактори, які можуть впливати на точність визначення координати витоку:

1. Відносне положення точки витоку (X/L) – визначає місце витоку вздовж трубопроводу.
2. Витрата рідини ($\Delta Q/Q$, л/с) – впливає на динаміку тиску в системі.
3. Розмір отвору витоку (ω_o , см²) – характеризує інтенсивність витоку.
4. Діаметр трубопроводу (D , м) – визначає гідродинамічні умови потоку.

Кожен фактор приймав кілька рівнів значень, що дозволило отримати повну картину його впливу.

2.1.3 Кодовані рівні факторів

Для зручності обробки даних фактори були закодовані за стандартною методикою:

$$X_i = \frac{X'_i - X'_{oi}}{\Delta X'_i} \quad (2.1)$$

де X'_i – натуральне значення фактора;

X'_{oi} — нульовий рівень фактора;

$\Delta X'_{oi}$ – інтервал зміни фактора.

Кодовані рівні факторів наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1. Кодовані рівні факторів експерименту

Фактор	Кодоване позначення	Верхній рівень (+1)	Нижній рівень (-1)	Нульовий рівень (0)	Інтервал зміни
Відносне положення витоку X/L	X_1	0.9	0.1	0.5	0.8
Витрата рідини $\Delta Q/Q$	X_2	0,50	0,04	0,25	0,46
Розмір отвору витоку ω_o , см ²	X_3	5	1	2.72	4
Діаметр трубопроводу D , м	X_4	0.512	0.1	0.311	0.412

Кодовані рівні (+1, 0, -1) використовуються для стандартизації обчислень.

Значення рівнів було обрано на основі попередніх досліджень та реальних умов експлуатації трубопроводів.

2.1.4 Матриці експерименту

Для кожної серії було складено план-матрицю експерименту.

Рядки відповідають дослідом, а стовпці – рівням факторів.

Таблиця 2.2. Матриця експерименту для серії №1 (за X/L)

№ досліду	X/L	Q (л/с)	ω_o (см ²)	D (м)
1.1	0,1	100	2,72	0,311
1.2	0,3	100	2,72	0,311
1.3	0,5	100	2,72	0,311
1.4	0,7	100	2,72	0,311
1.5	0,9	100	2,72	0,311

У цій серії змінювався лише X/L , а інші параметри були фіксованими.

Таблиця 2.3. Матриця експерименту для серії №2 (за Q)

№ досліду	X/L	Q (л/с)	ω_o (см ²)	D (м)
2.1	0,5	100	2,72	0,311
2.2	0,5	50	2,72	0,311
2.3	0,5	33.3	2,72	0,311
2.4	0,5	25	2,72	0,311
2.5	0,5	20	2,72	0,311
2.6	0,5	8	2,72	0,311

У цій серії змінювався лише Q , а інші параметри були фіксованими.

Таблиця 2.4. Матриця експерименту для серії №3 (за ω_o)

№ досліду	X/L	Q (л/с)	ω_o (см ²)	D (м)
3.1	0,5	100	1	0,311
3.2	0,5	100	2	0,311
3.3	0,5	100	2,72	0,311
3.4	0,5	100	4	0,311
3.5	0,5	100	5	0,311

У цій серії змінювався лише W_o , а інші параметри були фіксованими.

Таблиця 2.5. Матриця експерименту для серії №4 (за D)

№ досліду	X/L	Q (л/с)	ω_o (см ²)	D (м)
4.1	0,5	100	2,72	0,1
4.2	0,5	100	2,72	0,209
4.3	0,5	100	2,72	0,311
4.4	0,5	100	2,72	0,41
4.5	0,5	100	2,72	0,512

У цій серії змінювався лише D , а інші параметри були фіксованими.

Для виконання регресійного аналізу побудовано кодовану матрицю експерименту. У цій матриці всі фактори подані у безрозмірному вигляді, що дозволяє їх коректно обробляти у регресійному аналізі.

Таблиця 2.6. Кодована матриця експерименту

№ досліджу	Назва досліджу	X_1 (x/L)	X_2 ($\Delta Q/Q$)	X_3 (ω_o)	X_4 (D)	X_1X_2	X_1X_3	X_2X_3
1	Мінімальне X/L	-1	0	0	0	+	0	0
2	Середнє X/L	0	0	0	0	+	0	0
4	Максимальне X/L	+1	0	0	0	-	0	0
5	Мінімальне $\Delta Q/Q$	0	-1	0	0	0	-	0
6	Максимальне $\Delta Q/Q$	0	1	0	0	+	0	0
7	Мінімальна ω_o	0	0	-1	0	0	0	-
8	Максимальна ω_o	0	0	+1	0	0	0	-
9	Мінімальний D	0	0	0	-1	0	0	0
10	Максимальний D	0	0	0	+1	0	0	0

X_1 , X_2 , X_3 , X_4 – кодовані значення факторів (нормалізовані від -1 до +1). X_1X_2 , X_1X_3 , X_2X_3 – добутки факторів (для оцінки взаємодії між параметрами). Назви дослідів допомагають описати, які рівні факторів використовуються в кожному експерименті. Кожна серія експерименту була спрямована на дослідження одного окремого фактора, а решта факторів залишалися незмінними (на нульовому рівні). Тому в більшості дослідів змінюється лише один фактор, а інші фактори зафіксовані на 0.

2.2. Опис похибок, класів точності і типових приладів вимірювального обладнання

2.2.1. Порівняння типових лічильників води

Для трубопроводів великого діаметра, зокрема DN 300 мм, використовуються три основні типи лічильників: турбінні, ультразвукові та електромагнітні. Вибір між ними залежить від умов експлуатації, необхідної точності, стабільності роботи в агресивному або забрудненому середовищі, а також можливостей передачі даних до централізованих систем обліку.

Турбінний лічильник типу Rowogaz MWN-130-300 побудований за класичним механічним принципом, де вода, що проходить через прилад, обертає турбіну. Пристрій має фланцеве з'єднання, стандартну монтажну довжину 500 мм, витримує тиск до 16 бар і призначений для вимірювання температури до 130°C. Його діапазон витрат коливається від 35 до 1200 м³/год, при цьому клас точності відповідає В за європейською MID-класифікацією, а похибка становить $\pm 2\%$ у робочому діапазоні і $\pm 5\%$ при низьких витратах. Такий лічильник може бути оснащений імпульсним виходом для передавання даних до автоматизованих систем. Серед переваг цього типу — простота конструкції, низька вартість та достатня надійність в умовах стабільного потоку. Недоліками є відносно висока похибка при малих витратах, наявність рухомих частин, що зношуються, а також потреба в прямих ділянках трубопроводу для коректної роботи.

Ультразвуковий лічильник Ергомера-125.АВ вимірює витрату за допомогою аналізу часу проходження ультразвукових імпульсів у прямому і зворотному напрямку. Він не має рухомих частин, що значно зменшує ймовірність зношування, а також підвищує надійність у довгостроковій перспективі. Діаметр підключення може становити до 3000 мм, тиск – до 24 бар, температура – до 150°C. Діапазон витрати охоплює потоки швидкістю

від 0,02 до 10 м/с, а клас точності відповідає 2, з типовою похибкою $\pm 2\%$. У приладі реалізовані сучасні цифрові інтерфейси – RS-232, RS-485, Ethernet, Modbus – а також аналогові виходи, що дозволяє інтегрувати його у будь-яку систему SCADA або диспетчеризації. Його сильними сторонами є висока точність, надійність у брудному середовищі, можливість встановлення в будь-якому положенні трубопроводу та дистанційне зчитування. До мінусів належить вища ціна порівняно з механікою та залежність від джерела живлення – мережі або батареї.

Електромагнітний лічильник Siemens MAG 5100W вимірює витрату на основі принципу електромагнітної індукції, коли рідина, що проводить струм, перетинає магнітне поле, створюючи електричний сигнал. Пристрій підходить для трубопроводів DN 300, працює в діапазоні витрат від 10 до 2800 м³/год, при робочому тиску до 16 бар і температурі до 70°C, або до 150°C у спеціальних виконаннях. Клас точності приладу сягає 0,5% або навіть 0,2%, що робить його найбільш точним серед наведених варіантів. Siemens підтримує широкий спектр цифрових протоколів зв'язку, включно з Modbus, Profibus, HART, Ethernet/IP, має аналогові виходи (4–20 мА) та імпульсні сигнали. Його переваги включають високу точність, повну відсутність рухомих частин, мінімальне обслуговування, довговічність та можливість роботи з агресивними або слабопровідними рідинами. Водночас основними недоліками є висока вартість і потреба в надійному електроживленні.

У таблиці 2.7 зведено ключові технічні параметри трьох розглянутих типів лічильників, їхні функціональні можливості та практичні відмінності.

Таблиця 2.7 – Порівняльна таблиця лічильників води (DN 300)

Характеристика	Турбінний (Powogaz MWN-300)	Ультразвуковий (Ергомера-125.АВ)	Електромагнітний (Siemens MAG 5100W)
Тип вимірювання	Механічний (турбіна)	Ультразвук	Електромагнітна індукція
Номінальний діаметр DN	300 мм	300 мм	300 мм
Діапазон витрат	16 – 2000 м³/год	15 – 3000 м³/год	10 – 2800 м³/год
Точність	Клас В / $\pm 2 \dots 5\%$	Клас 2 / $\pm 2\%$	Клас 0.5 або 0.2 / $\pm 0.5\%$ або $\pm 0.2\%$
Робочий тиск	до 16 бар	до 24 бар	до 16 бар
Температура	до 50°C	до 150°C	до 70°C (або 150°C спец. виконання)
Передача даних	Імпульсний вихід	RS-232/485, Modbus, 4–20 мА, Ethernet	Modbus, Profibus, HART, 4–20 мА
Клас захисту	IP68 (опція)	IP66/67	IP68
Електроживлення	Не потрібне (пасивне)	220 В або батарея	220 В / пост. струм / батарея
Наявність рухомих частин	Є	Немає	Немає
Підходить для брудної води	Умовно	Так	Так
Орієнтація потоку	Односторонній	Двозначний (реверсивний)	Двозначний (реверсивний)

2.2.2. Порівняння датчиків тиску

Відповідно до європейського стандарту EN 837-1:1996, манометри з розміром шкали 250 мм мають оптимальну точність $\pm 0,25\%$ від повної шкали (FS), для 100 мм – $\pm 0,6\%$. Оскільки робочий тиск у мережі повинен бути близьким до середини шкали, відносна похибка вимірювання тиску буде удвічі більшою — тобто 0,2%, 0,5% та 1,2% відповідно.

Також одним із ключових параметрів, що визначає ефективність та надійність роботи систем водопостачання, є тиск. Для контролю цього параметра широко застосовуються датчики тиску. У межах дослідження проведено порівняння трьох популярних моделей датчиків тиску, що використовуються у водопровідних мережах.

WIKA S-20 — це високоточний промисловий датчик, вироблений у Німеччині. Діапазон вимірювання складає 0...10 бар, проте доступні й інші варіанти залежно від потреб користувача. Клас точності пристрою становить 0.25%, а стандартна похибка — $\pm 0.25\%$ від повної шкали. Вихідний сигнал може бути у форматі 4...20 мА або 0...10 В, а живлення здійснюється в межах 10...30 В DC. Пристрій функціонує в температурному діапазоні від -20 до +85°C, виготовлений із нержавіючої сталі та має ступінь захисту IP65 або IP67. Для підключення передбачена різьба G1/2" або 1/4". Орієнтовна ціна датчика — від \$571.

Danfoss MBS 3000 — датчик датської розробки, призначений для широкого спектру промислових застосувань. Основний вимірювальний діапазон — 0...10 бар, хоча можливі конфігурації до 600 бар. Клас точності становить 1.0%, з відповідною похибкою $\pm 1.0\%$ від повної шкали. Можливі варіанти вихідного сигналу: 4...20 мА, 0...5 В або 1...5 В. Пристрій живиться від джерела постійного струму в межах 10...30 В DC і може працювати при температурах від -40 до +85°C. Корпус виготовлено з нержавіючої сталі, ступінь захисту — IP65 або IP67. Варіанти підключення включають G1/4", G1/2" і 1/4-18 NPT. Орієнтовна вартість становить близько \$190.

IFM PN7093 — німецький електронний датчик тиску з розширеним функціоналом. Діапазон вимірювання становить 0...10 бар, клас точності — 0.5%, а похибка — $\pm 0.5\%$ від повної шкали. Пристрій оснащено двома транзисторними виходами та аналоговим виходом 4...20 мА. Живлення — 18...30 В DC, температурний діапазон — від -25 до +80°C. Корпус виконано з нержавіючої сталі з додатковими елементами з пластику, а ступінь захисту сягає рівнів IP67, IP68 та IP69K. Додатковою перевагою є наявність вбудованого дисплея з кнопковим налаштуванням. Різьбове з'єднання — G1/2", а ціна на ринку стартує від \$217.16.

Таблиця 2.8 – Порівняння датчиків тиску води

Характеристика	Wika S-20	Danfoss MBS 3000	IFM PN7093
Країна виробника	Німеччина	Данія	Німеччина
Діапазон вимірювання (бар)	0...10	0...10	0...10
Клас точності (%)	0.25	1.0	0.5
Похибка (%)	± 0.25	± 1.0	± 0.5
Тип виходу	4–20 мА / 0–10 В	4–20 мА / 0–5 В / 1–5 В	2× транзисторні виходи + 4–20 мА
Живлення (В DC)	10–30	10–30	18–30
Температура компенсації (°C)	-20...+85	-40...+85	-25...+80
Захист	IP65 / IP67	IP65 / IP67	IP67 / IP68 / IP69K
Приблизна ціна	від \$570	\$190	\$210

2.2.3. Похибки вимірювання довжини трубопроводів

У дослідженнях, що вимагають високої точності — таких як моделювання втрат напору, гідравлічне калібрування або локалізація витоків — похибки у визначенні довжини трубопроводів мають бути мінімізовані. Найбільш надійним методом є геодезичні вимірювання, зокрема використання електронного тахеометра або GNSS-технологій з кінематичним позиціонуванням у реальному часі (RTK). У разі застосування тахеометра середня похибка становить приблизно $\pm(2\text{--}5 \text{ мм} + 1\text{--}2 \text{ мм}/100 \text{ м})$, тоді як RTK-GPS забезпечує точність у межах $\pm 1\text{--}2 \text{ см}$ у плані та $\pm 2\text{--}4 \text{ см}$ по висоті. Такі методи дозволяють враховувати повороти, ухили і реальне прокладення трубопроводу, однак точність GNSS може знижуватися в умовах щільної забудови, під деревами або поблизу споруд.

Іншим розповсюдженим підходом є використання геодезичних планів або ГІС-схем, де довжина трубопроводу визначається шляхом цифрового трасування за наявними координатами. У цьому випадку точність залежить від масштабу карти: для плану масштабу 1:500 похибка становить до $\pm 0,2$ м, а при масштабі 1:1000 — до $\pm 0,5$ м. У середньому на ділянках до 1 км така методика дає загальну похибку в межах $\pm 0,5\%$ – 1% . Метод є зручним для швидкого аналізу протяжних мереж, однак значно залежить від актуальності та точності джерел.

Високоточні GPS-системи з постобробкою сигналу (РРК, або Post-Processed Kinematic) забезпечують ще кращу точність, з типовим відхиленням у плані ± 1 – 3 см і у висоті ± 3 – 5 см. При застосуванні на дистанції до 1 км сумарна похибка зазвичай не перевищує $\pm 0,1\%$, що робить метод придатним для використання навіть у складних умовах, де РТК нестабільний. Недоліком є необхідність доступу до базових станцій або використання платних сервісів постобробки.

Ще один високоточний метод — лазерне сканування, або мобільне лазерне картографування. Це технологія 3D-сканування траси трубопроводу, яка забезпечує абсолютну точність на рівні ± 1 – 2 см у сприятливих умовах, із сумарною похибкою, що не перевищує $\pm 0,2\%$. Метод дозволяє отримати детальну просторову модель траси разом із рельєфом місцевості, однак потребує дорогого обладнання та значного ресурсу для обробки даних.

Для довідки можна також згадати ручні методи, такі як рулетка або колісний мірник. У польових умовах їх точність коливається в межах $\pm 0,5$ – 2% , однак вони вважаються непридатними для точних досліджень через суб'єктивність, вплив людського фактора та обмежену здатність враховувати криволінійні траси.

Таблиця 2.9 – Порівняння методів визначення довжини трубопроводів

Метод	Відносна похибка (%)	Абсолютна похибка (м)	Придатність для точних досліджень
Геодезичний тахеометр	$\pm 0.005\%$	± 0.05 м	Дуже висока
RTK-GNSS (в реальному часі)	$\pm 0.05\%$	± 0.5 м	Висока
РРК (GNSS з постобробкою)	$\pm 0.01\%$	± 0.1 м	Дуже висока
Лазерне сканування (мобільне)	$\pm 0.2\%$	± 2.0 м	Висока
ГІС-плани масштабу 1:500	$\pm 0.5\%$	± 5.0 м	Середня
Ручне вимірювання (рулетка)	$\pm 1.5\%$	± 15.0 м	Низька

2.2.4. Похибки вимірювання висотних позначок (відміток)

Похибки, пов'язані з вимірюванням відміток висоти (Z), також впливають на точність локалізації. Використання диференційного GPS дозволяє вимірювати висоти з точністю $\pm 0,01$ м, а абсолютна похибка вимірювання довжини трубопроводних ділянок — зазвичай $\pm 0,5$ м. Для більш точного визначення питомої ваги води необхідно вимірювати її температуру. Стандартні датчики температури мають точність $\pm 0,5$ °C.

Визначення висотних позначок, як абсолютних, так і відносних, є надзвичайно важливим у гідравлічному аналізі трубопроводних систем. Навіть незначна похибка у вимірюванні, на рівні кількох сантиметрів, може суттєво вплинути на результати розрахунків гідростатичного тиску, визначення напрямку потоку або на точність математичних моделей витоків. Для досягнення необхідної точності застосовуються різноманітні методи, які мають різні рівні похибки, залежно від принципу дії та умов проведення вимірювань.

Найточнішим традиційним методом залишається геометричне нівелювання. У випадку нівелювання I класу точність досягає ± 0.5 мм на кожен кілометр подвійного ходу, а для нівелювання II класу – близько ± 2 мм/км. Таким чином, абсолютна похибка вимірювання на протязі 1 км становить від ± 0.0005 до ± 0.002 метра. Цей метод забезпечує максимальну точність, однак є досить трудомістким і вимагає прямої видимості між точками.

Широке застосування також знаходять GNSS-технології з кінематичним режимом в реальному часі (RTK-GNSS), які забезпечують точність у висоті в межах ± 2 – 4 см. На маршруті довжиною 1 км абсолютна похибка зазвичай становить від ± 0.02 до ± 0.04 метра. Метод дозволяє оперативно проводити вимірювання, однак поступається у вертикальній точності геометричному нівелюванню та чутливий до зовнішніх перешкод, таких як дерева, будівлі або рельєф.

Більш стабільні результати у складних умовах дає GNSS у режимі постобробки (PPK). У цьому випадку точність у висоті становить ± 1.5 – 3.0 см, з абсолютною похибкою на дистанції 1 км у межах ± 0.015 – 0.03 м. Метод вимагає наявності базових станцій або використання спеціалізованих сервісів корекції, однак забезпечує стабільність і точність навіть при складному покритті.

Лазерне сканування, як мобільне, так і стаціонарне (LiDAR), є ще одним ефективним способом визначення висотних відміток. Такий метод дозволяє досягти точності у висоті на рівні ± 2 – 5 см, з похибкою на 1 км від ± 0.02 до ± 0.05 м. Його перевагою є можливість створення детальної 3D-моделі з урахуванням рельєфу та навколишнього середовища, проте вартість обладнання та обробка великих обсягів даних можуть стати обмеженням для практичного застосування в кожному проєкті.

Варто також згадати барометричні методи визначення висоти, однак через їхню нестабільність і значну похибку ($\pm 0.5\text{--}2$ м, залежно від атмосферних умов) вони непридатні для використання у гідравлічних розрахунках і розглядаються виключно як орієнтовні.

Таблиця 2.10 – Порівняння точності методів визначення висотних позначок (на 1 км)

Метод	Відносна похибка (%)	Абсолютна похибка (м)	Придатність для точних досліджень
Геометричне нівелювання I класу	$\pm 0,00005\%$	± 0.0005 м	Дуже висока
Геометричне нівелювання II класу	$\pm 0,0002\%$	± 0.0020 м	Висока
PPK-GNSS	$\pm 0,0015\text{--}0.003\%$	$\pm 0.015\text{--}0.03$ м	Висока
RTK-GNSS	$\pm 0.002\text{--}0.004\%$	$\pm 0.02\text{--}0.04$ м	Середня – висока
Лазерне сканування (LiDAR)	$\pm 0.002\text{--}0.005\%$	$\pm 0.02\text{--}0.05$ м	Середня

2.2.5 Детальне обґрунтування похибок прийнятих при проведенні розрахунку статистично - гідравлічним методом

У роботі виконано серію імітаційних чисельних експериментів з визначення відносної похибки аналітичної локалізації місця одиночного витоку з використанням описаного вище гідравлічного методу. При розрахунку імітованого витоку води обґрунтовано абсолютні або відносні похибки для кожного з 10 вхідних параметрів.

При вимірюванні температури води датчиком температури витратоміра ЕРГОМЕРА 125 абсолютна похибка становить – $\pm 0,5$ °C

При вимірюванні витрати води лічильником ЕРГОМЕРА - 125 відносна похибка при вимірюванні об'єму витрати води становить 1%

Максимальні допустимі похибки визначення вхідних параметрів було прийнято за типовими характеристиками відповідних вимірювальних приладів, зокрема похибки визначення позначок осі трубопроводу на початку та в кінці ділянки прийнято рівними $\pm 0,01$ м, надлишкових тисків p_1 та p_2 $\pm 0,4\%$, довжини трубопроводу $\pm 0,5$ м, діаметру трубопроводу $\pm 0,7\%$, витрат води $\pm 2,5\%$, швидкостей $\pm 2\%$, температури $\pm 0,5$ °С, кінематичної в'язкості $\pm 2,0 \times 10^{-8}$ м²/с, еквівалентної шорсткості $\pm 0,03$ мм.

Прийнято припущення щодо нормального закону розподілу похибки для кожного з вхідних параметрів у межах допустимого діапазону. Фактичну величину похибки за кожним із вхідних параметрів визначали за допомогою функції генерування випадкової величини в діапазоні від 0 до 1, при цьому нулю відповідало нижнє граничне значення похибки зі знаком мінус, а одиниці – максимальне додатне значення похибки.

Імітаційне тестування точності методу пошуку прихованих витоків виконано для сталюого трубопроводу діаметром 300 мм., довжиною 1000м, та еквівалентною шорсткістю 0,07 мм. Тестування виконано для значень витрати $Q_1 = 0,2$ м³/с, $Q_2 = 0,18$ м³/с (що відповідає витоку $\Delta Q = 0,02$ м³/с або 10% від витрати на початку ділянки), що відповідає значенням числа Рейнольдса $Re_1 = 356419$, $Re_2 = 320777$.

Приведена похибка визначення координати точки витoku у межах довірчого інтервалу не залежить від місця розташування витoku на ділянці та змінюється в діапазоні від +0,16% до +0,50% відносно точного значення, що для ділянки довжиною 1000 м відповідає абсолютним похибкам від +1,6 м до +5,0 м.

2.3. Математична обробка та статистичний аналіз результатів

2.3.1. Математична обробка результатів

Розрахунки проведено автоматизовано у Microsoft Excel, що дозволило обробити велику кількість даних та мінімізувати похибки під час обчислень.

Експериментальні розрахунки виконувалися у електронних таблицях Microsoft Excel. Для кожної серії було створено окремий файл, у якому реалізовано:

- Генерацію даних для кожного рівня факторів.
- Розрахунок середньої похибки $\varepsilon_{\text{Xmid}}$ для кожного досліджу.
- Обчислення стандартного відхилення (STD) для оцінки розкиду результатів.
- Перевірку статистичних критеріїв для оцінки надійності отриманих даних.
- Побудову рівняння регресії для визначення залежності похибки від факторів.

2.3.2. Статистичний аналіз результатів

У цьому розділі проводиться перевірка точності отриманих результатів за допомогою критеріїв Кохрена, Стюдента та Фішера та побудова рівняння регресії. Ці критерії дозволяють оцінити однорідність дисперсій, значущість факторів та адекватність рівняння регресії.

2.3.2.1. Критерій Кохрена (перевірка однорідності дисперсій). Критерій Кохрена використовується для перевірки однорідності дисперсій у вибірці. Якщо дисперсії неоднорідні, це може свідчити про значні відхилення у вимірюваннях або помилки в експерименті.

Критерій Кохрена:

$$G = \frac{\max(S_i^2)}{\sum S_i^2} \quad (2.2)$$

де:

S_i^2 – дисперсія результатів у і-му досліді;

$\max(S_i^2)$ – максимальна дисперсія у вибірці;

ΣS_i^2 – сума всіх дисперсій.

Умови прийнятності:

- якщо $G_{\text{exp}} < G_{\text{critical}}$, дисперсії вважаються **однорідними**, і можна продовжувати аналіз.
- якщо $G_{\text{exp}} > G_{\text{critical}}$, дисперсії **неоднорідні**, що може впливати на точність аналізу.

Таблиця 2.11 Результати перевірки критерієм Кохрена

Серія	G_{exp}	G_{critical}	Висновок
x/L	0.278	0.684	Однорідні
Q	0.538	0.678	Однорідні
Wo	0.818	0.684	Неоднорідні
D	0.744	0.684	Неоднорідні

Отже, результати у серіях **x/L** та **Q** мають **однорідні дисперсії** – можна продовжувати аналіз. У серіях **Wo** та **D** – дисперсії **неоднорідні**, що може впливати на точність подальших розрахунків.

2.3.2.2. Критерій Стюдента (оцінка значущості факторів). Критерій Стюдента використовується для визначення, чи є вплив певного фактора на результати статистично значущим. **Формула критерію Стюдента:**

$$t = \frac{|b_i|}{S\beta} \quad (2.3)$$

де $|b_i|$ – коефіцієнт регресії для і-го фактора; $S\beta$ – стандартне відхилення коефіцієнта.

Умови прийнятності:

- якщо $t_{\text{exp}} > t_{\text{critical}}$, фактор є **значущим**;
- якщо $t_{\text{exp}} < t_{\text{critical}}$, фактор не має суттєвого впливу.

Таблиця 2.12. Результати перевірки критерієм Стюдента

Серія	$t_{\text{exp}}(b_1)$	t_{critical}	Висновок
x/L	11.972	3.182	Значущий
Q	0.011	2.776	Незначущий
Wo	0.382	3.182	Незначущий
D	4.216	3.182	Значущий

X/L та D мають значущий вплив на похибку визначення координати витоку, **Q та Wo** не є значущими, їхній вплив можна не враховувати.

2.3.2.3 Критерій Фішера (Перевірка адекватності рівняння регресії)

Критерій Фішера дозволяє оцінити, **наскільки добре рівняння регресії відображає отримані дані.**

Формула критерію Фішера:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_{зал}^2} \quad (2.4)$$

де:

S_{ad}^2 – дисперсія адекватності (відхилення прогнозних значень від експериментальних);

$S_{зал}^2$ – середня дисперсія залишків.

Умови прийнятності:

- Якщо $F_{\text{exp}} < F_{\text{critical}}$, рівняння **адекватне** і може використовуватися для прогнозування.
- Якщо $F_{\text{exp}} > F_{\text{critical}}$, рівняння не описує залежність правильно.

Таблиця 2.13 Результати перевірки критерієм Фішера

Серія	F_{exp}	F_{critical}	Висновок
X/L	1.741	7.709	Адекватне
D	0.024	7.709	Адекватне

Рівняння регресії для X/L та D є адекватними, що підтверджує правильність отриманих залежностей. Рівняння для Q та W_0 не обчислювалися, оскільки ці фактори виявилися незначущими.

2.3.3 Побудова рівнянь регресії

На основі статистичного аналізу побудовано **спрощені рівняння регресії** для значущих факторів:

Залежність похибки від X/L :

$$\varepsilon_{X_{mid}} = 11,97 \cdot X / L \quad (2.5)$$

Залежність похибки від D :

$$\varepsilon_{X_{mid}} = 4.22 \cdot D \quad (2.6)$$

Похибка визначення координати збільшується із збільшенням X/L . Діаметр труби також впливає на точність, хоча цей ефект менш виражений. Витрата рідини (Q) та розмір отвору (ω_0) не впливають значущо на похибку.

2.4. Висновки

1. Враховуючи багатфакторність задачі про локалізацію прихованих витоків гідравлічними методами, у дисертаційній роботі виконано планування чисельного та натурного експериментів з визначення точності локалізації прихованих витоків за допомогою статистично-гідравлічного методу.

2. Систематична приведена похибка статистично-гідравлічного методу та її стандартне відхилення визначалися як функції 5 вхідних параметрів, а саме безрозмірної витрати витoku, діаметра трубопроводу, площі отвору, надлишкового тиску на ділянці та відносної координати витoku.

3. Розроблено алгоритм і програму для автоматизованої локалізації прихованих витоків за допомогою статистично-гідравлічного методу, реалізовану в середовищі Microsoft Excel.

4. Виконано перевірку статистичних критеріїв Кохрена, Стюдента, Фішера та побудовано рівняння регресії для ключових вхідних факторів. Найбільший вплив на приведену похибку локалізації витoku має відносна координата витoku, дещо менш впливовим фактором є діаметр трубопроводу D та відносна витрата витoku, а площа отвору та тиск на ділянці не мають значного впливу.

5. Перевірено однорідність дисперсій за критерієм Кохрена. Дисперсії для X/L та $\Delta Q/Q$ – однорідні, що підтверджує достовірність даних, тоді як дисперсії для ω_0 та D неоднорідні, що може вказувати на додаткові похибки у вимірюваннях.

6. Визначено значущість факторів за критерієм Стюдента. Найбільш статистично значущими факторами є X/L та D , тоді як $\Delta Q/Q$ та ω_0 можуть бути виключені у наближених моделях, оскільки їх вплив неістотний.

Розділ 3

ТЕОРЕТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ ЯВИЩ У ВОДОПРОВІДНИХ МЕРЕЖАХ ЗА НАЯВНОСТІ ПРИХОВАНИХ ВИТОКІВ

3.1. Аналіз похибок методу гідравлічного градієнта

Базовим гідравлічним методом для локалізації прихованих витоків є метод гідравлічного градієнта, вперше представлений в роботі [21] та розвинутий надалі в ряді досліджень. Суть методу описана в розділі 1. Нижче виконано аналіз відносних похибок локалізації прихованих витоків за методом гідравлічного градієнта з визначенням основних факторів, які мають вплив на точність методу. Ідея методу гідравлічного градієнта полягає у побудові ліній напору на ділянці АВ за даними натурного вимірювання тиску в кінцевих вузлах А і В, а також у деякій проміжній точці С (рис. 3.1). Метод вимагає наявності запірно-регулювальної арматури у вузах А і В (відповідно, засувки 3.1 та 3.2), а також відсутності бічних відгалужень на ділянці АВ, або ж можливості їх повного перекриття за наявності.

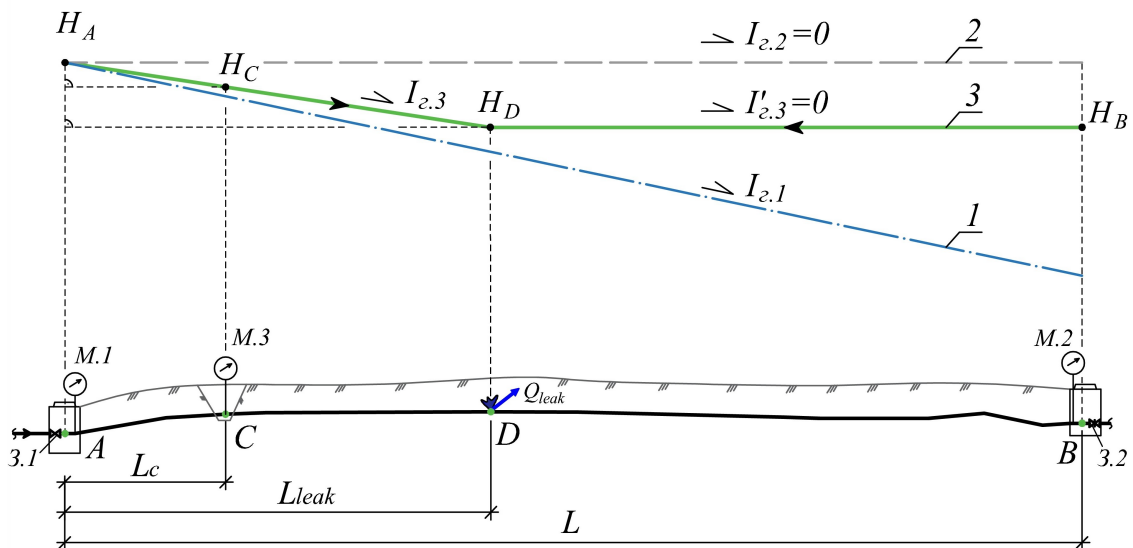


Рис. 3.1. Принципова схема локалізації прихованого витоку за методом гідравлічного градієнта (вказані лінії напірні лінії: 1 – за відкритих засувки 3.1 та 3.2; 2 – за закритої засувки 3.2 при відсутності витоків; 3 – за закритої засувки 3.2 та наявності одиночного витоку у т. D)

У випадку відкритих засувок 3.1 та 3.2 та відсутності витоків та бічних відгалужень, за умови що діаметр, матеріал, вік та еквівалентна шорсткість трубопроводу є однаковими по довжині ділянки АВ, лінія повного напору має вигляд прямої лінії (лінія 1) з постійним на всій ділянці гідравлічним градієнтом I_{z1} .

За відкритої засувки 3.1 та закритої засувки 3.2 при відсутності витоків п'єзометричні напори в точках А і В будуть однаковими, а напірна лінія 2 – строго горизонтальною, тобто гідравлічний похил $I_{z2} = 0$.

У випадку, якщо на ділянці АВ має один або декілька витоків, повні напори H_A і H_B у вузлах А та В відрізнятимуться. Таким чином, фіксація різних гідравлічних напорів у крайніх вузлах ділянки АВ за відкритої засувки 3.1 та закритої 3.2 є свідченням наявності на ділянці одного або кількох витоків. У випадку наявності лише одного виток, його можна локалізувати з використанням методу гідравлічного градієнта. Нехай одиночний прихований витік має місце у деякій довільній т. D (рис. 3.1). Для визначення координати виток L_{leak} необхідно визначити гідравлічний напір ще в одній проміжній точці С, причому точка С має бути ближчою до вузла А, ніж точка виток D.

Визначення повного напору у точці С (H_C) дає можливість знайти гідравлічний градієнт I_{z3} . Точка виток (т. D) знаходиться на перетині лінії повного напору, проведеної через точки з напорами H_A та H_C , до перетину з горизонтальною лінією, що відповідає напору H_B (лінія 3 на рис. 3.1). Нехтуючи швидкісними напорами у точках А і С, координата точки виток:

$$L_{leak} = \frac{(H_{p.A} - H_{p.B})}{(H_{p.A} - H_{p.C})} L_C \quad (3.1)$$

Оцінимо додаткову можливу похибку, спричинену неврахуванням швидкісного напору на ділянці AD (рис. 3.2). Швидкісний напір при реалізації методу гідравлічного градієнта є невідомим, оскільки метод не передбачає вимірювання об'ємних витрат.

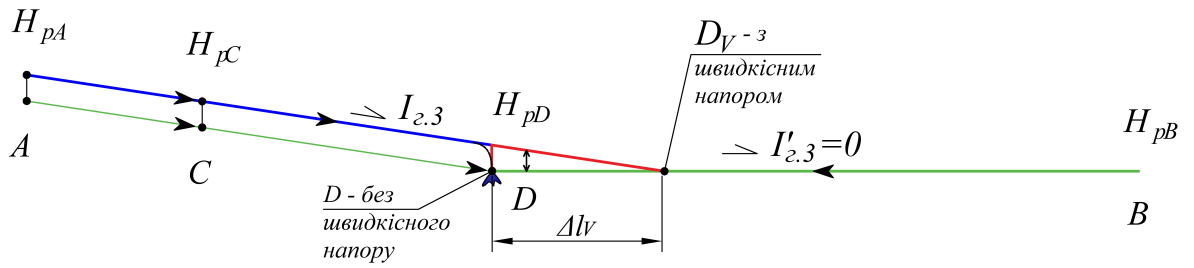


Рис. 3.2. Схема для пояснення впливу швидкісних напорів у перерізах A і C на точність методу гідралічного градієнта

Якщо враховувати швидкісний напір перед точкою D на підході до точки витoku, то витрата витoku:

$$Q_{leak} = \mu_o \omega_o \sqrt{2gH_D} \quad (3.2)$$

$$H_D = H_{p.D} + \frac{\alpha V_l^2}{2g} \quad (3.3)$$

Середня швидкість потоку на ділянці до витoku:

$$V_l = \frac{4Q_{leak}}{\pi d^2} \quad (3.4)$$

звідки

$$H_D = H_{p.D} + \frac{8\alpha Q_{leak}^2}{\pi^2 g d^4} \quad (3.5)$$

Після ряду перетворень можна отримати:

$$Q_{leak} = \mu_o \omega_o \sqrt{2g} \sqrt{H_{p.D} + \frac{8\alpha Q_{leak}^2}{\pi^2 g d^4}} \quad (3.6)$$

$$Q_{leak}^2 = 2g\mu_o^2 \omega_o^2 \left(H_{p.D} + \frac{8\alpha Q_{leak}^2}{\pi^2 g d^4} \right) \quad (3.7)$$

$$Q_{leak}^2 \left(1 - \frac{16\alpha\mu_o^2 \omega_o^2}{\pi^2 d^4} \right) = 2g\mu_o^2 \omega_o^2 H_{p.D} \quad (3.8)$$

звідки витрата витoku:

$$Q_{leak} = \sqrt{\frac{2g\mu_o^2\omega_o^2 H_{p.D}}{\left(1 - \frac{16\alpha\mu_o^2\omega_o^2}{\pi^2 d^4}\right)}} \quad (3.9)$$

$$Q_{leak} = \sqrt{\frac{2g\pi^2 d^4 \mu_o^2 \omega_o^2 H_{p.D}}{(\pi^2 d^4 - 16\alpha\mu_o^2 \omega_o^2)}}, \quad (3.10)$$

або остаточно, приводячи рівняння (3.10) до форми рівняння стаціонарного витікання рідини крізь малий отвір у тонкій стінці (3.11):

$$Q_{leak} = \mu_o \omega_o \sqrt{2g} \sqrt{\frac{\pi^2 d^4}{(\pi^2 d^4 - 16\alpha\mu_o^2 \omega_o^2)}} H_{p.D} \quad (3.11)$$

Для порівняння, якщо не враховувати швидкісний напір перед точкою D , то формула для визначення витрати витоку:

$$Q_{leak}^* = \mu_o \omega_o \sqrt{2gH_{p.D}} \quad (3.12)$$

Таким чином, врахування швидкісного напору дає наступне відносне збільшення розрахункової витрати витоку:

$$\frac{Q_{leak}}{Q_{leak}^*} = \sqrt{\frac{\pi^2 d^4}{(\pi^2 d^4 - 16\alpha\mu_o^2 \omega_o^2)}} \quad (3.13)$$

Оцінимо кількісно похибку, пов'язану з неврахуванням швидкісного напору. Наприклад, при внутрішньому діаметрі трубопроводу $d = 0,1$ м, коефіцієнті кінетичної енергії 1,05, площі отвору 2 см^2 та коефіцієнті витрати отвору 0,6 [ІТНВПВ]:

$$\frac{Q_{leak}}{Q_{leak}^*} = \sqrt{\frac{\pi^2 0,1^4}{(\pi^2 0,1^4 - 16 \cdot 1,05 \cdot 0,6^2 \cdot 0,0002^2)}} = 1,00012 \quad (3.14)$$

тобто нехтування швидкісним напором на підході до точки D зумовлює в цьому випадку заниження розрахункової витрати витоку лише на 0,012%, що на 1–2 порядки менше за похибку визначення п'єзометричних напорів.

Найбільшою проблемою при реалізації методу гідравлічного градієнта є необхідність виконання земляних робіт для вимірювання п'єзометричного напору в допоміжній точці C . Оскільки місце витоку заздалегідь невідоме,

правильний вибір розташування точки С має критичне значення. Якщо припустити, що ймовірність появи витoku однакова вздовж всієї ділянки АВ, то чим ближче точка С до вузла А, тим імовірніше, що витік буде розташований далі за точкою С – і, отже, його можна буде локалізувати. З іншого боку, чим ближче точка С, тим вища похибка визначення градієнта на відрізьку АС при однаковій абсолютній похибці вимірювання тиску, що, своєю чергою, підвищує похибку визначення відстані до витoku L_{leak} .

Нижче наведено результати моделювання похибок локалізації одного витoku на типовій ділянці мережі з використанням методу гідравлічного градієнта. Представлено безрозмірну відстань до точки витoku як функцію від різниці п'єзометричних напорів:

$$L'_{leak} = \frac{L_{leak}}{L} = \left[\frac{(z_A + p_A / \gamma) - (z_B + p_B / \gamma)}{(z_A + p_A / \gamma) - (z_C + p_C / \gamma)} \right] \frac{L_C}{L} \quad (3.15)$$

де z_A, z_B, z_C – позначки осі трубопроводу в перерізах А, В і С відповідно, м;

p_A, p_B, p_C – надлишковий тиск в перерізах А, В і С відповідно, Па;

γ – питома вага води, Н/м³.

Відносна похибка вимірювання тиску δp залежить від класу точності приладу: 0,002 або 0,2% для класу 0,1; 0,005 або 0,5% для класу 0,25 та 0,012 або 1,2% для класу 0,6 (див. розділ 2).

При абсолютній похибці вимірювання температури води $\pm 0,5^\circ\text{C}$, для типових значень температури води у зовнішніх мережах водопостачання 5–15 $^\circ\text{C}$, відносна похибка визначення питомої ваги води не перевищує $\delta\gamma=0,01\%$. Максимальна відносна похибка визначення п'єзометричних висот p/γ становить:

$$\delta(p/\gamma) = \delta p + \delta\gamma \quad (3.16)$$

Нехтуючи на першому етапі різницею відміток висоти, відносна похибка у визначенні відношення різниць п'єзометричних тисків приблизно дорівнює:

$$\delta \left[\frac{(z_A + p_A / \gamma) - (z_B + p_B / \gamma)}{(z_A + p_A / \gamma) - (z_C + p_C / \gamma)} \right] \approx 4 (\delta p + \delta\gamma) \quad (3.17)$$

та, порівнюючи масштаби абсолютних похибок у p/γ та Z , відповідну поправку до відносної похибки у відношенні різниць п'єзометричних тисків можна записати як:

$$\delta \left[\frac{(z_A + p_A/\gamma) - (z_B + p_B/\gamma)}{(z_A + p_A/\gamma) - (z_C + p_C/\gamma)} \right] = 4(\delta p + \delta \gamma) \left(1 + \frac{\Delta Z}{2A_C H_A} \right), \quad (3.18)$$

Де абсолютна похибка у вимірюванні висотних відміток приймається $\Delta Z = 0.01$ м; безрозмірний клас точності манометра; а H_A п'єзометричний напір у початковому перерізі А, (м).

Нарешті, відносна похибка для безрозмірної відстані до точки витоку:

$$\delta L'_{leak} = 4(\delta p + \delta \gamma) \left(1 + \frac{\Delta Z}{2A_C H_A} \right) + \frac{\Delta L_C}{L_C} + \frac{\Delta L}{L}, \quad (3.19)$$

де ΔL_C , ΔL – абсолютні похибки у вимірюванні відстаней від перерізу А до точки С і до кінцевого перерізу В.

Враховуючи специфіку трасування підземних мереж водопостачання, визначення відстаней між характерними перерізами не може бути забезпечено з точністю більше ніж 0,5 м.

Важливим завданням при реалізації методу гідравлічного градієнта є раціональний вибір допоміжної точки С. За умови, що ймовірність прихованого витоку рівномірно розподілена вздовж довжини ділянки, отримуємо лінійне зменшення ймовірності у разі збільшення відстані до точки С:

$$\bar{p}_X = (1 - L_C / L). \quad (3.20)$$

Для раціонального визначення відстані до контрольної точки С, враховуючи вагу максимальної похибки та ймовірність виявлення витоку як ймовірні величини, може бути використана функція оптимізації у вигляді:

$$F_{opt} = \delta L'_{leak} / \bar{p}_X. \quad (3.21)$$

Тоді оптимальне розташування поперечного перерізу С відповідає мінімальному значенню функції оптимізації, яка у розгорнутому вигляді записується наступним чином:

$$F_{opt} = \frac{4 \delta p \left(1 + \frac{\Delta Z}{2 A_C H_A} \right) + \frac{\Delta L_C}{L_C} + \frac{\Delta L}{L}}{(1 - L_C / L)} \quad (3.22)$$

Рівняння (9) було розв'язано чисельно з метою визначення залежності оптимального розташування контрольного перерізу залежно від основних змінних вхідних параметрів, зокрема, від довжини ділянки L , класу точності манометрів АС і напору в початковій точці ділянки H_A .

Узагальнені залежності функції оптимізації F_{opt} та відносної похибки локалізації прихованих витоків $\delta L'_{leak}$ від безрозмірної відстані L_C/L до контрольної точки С, як показано на рис. 3.3–3.5. Нижні індекси функцій та похибок вказують на клас точності манометрів: 0,1, 0,25 та 0,6.

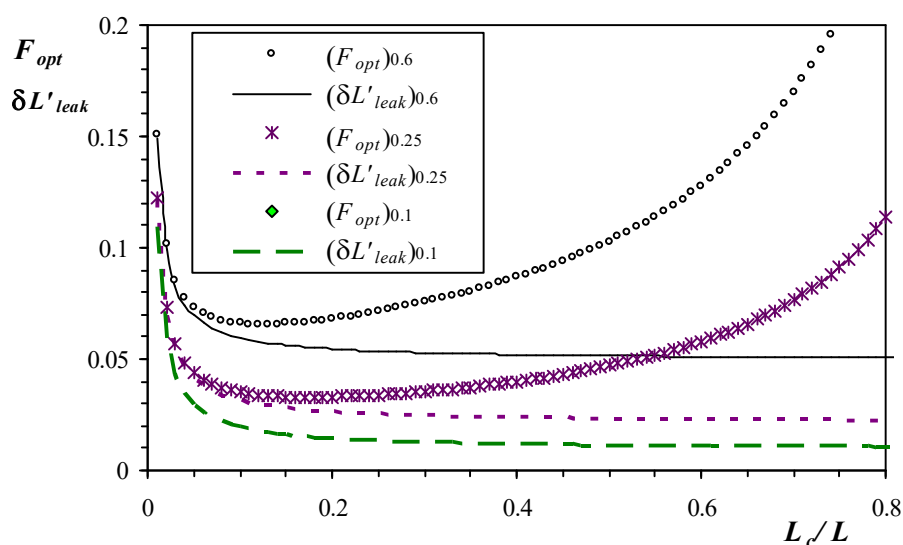


Рис. 3.3 Функція оптимізації F_{opt} , відповідні похибки локалізації прихованого витоку $\delta L'_{leak}$ для манометрів з класом точності 0,1, 0,25 і 0,6
($L = 500$ м; $H_A = 40$ м)

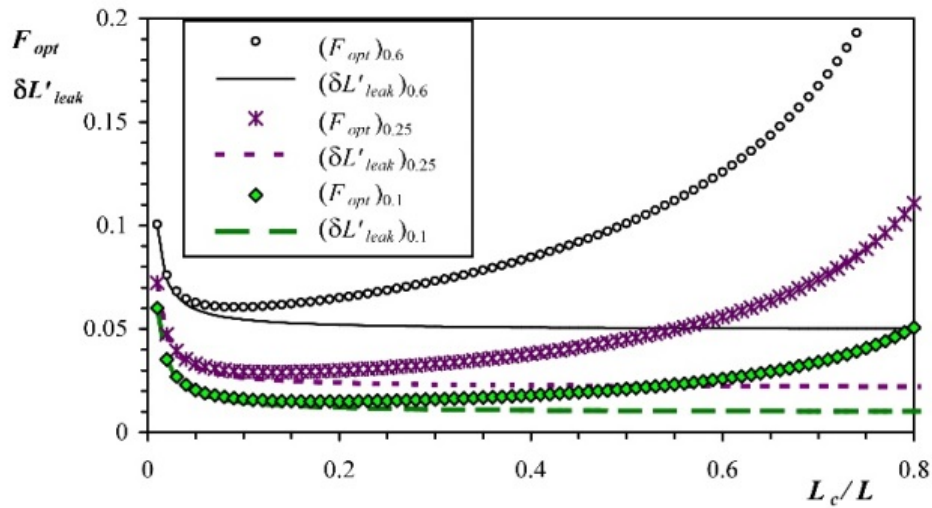


Рис. 3.4 Функція оптимізації F_{opt} , відповідні похибки локалізації прихованого витоку $\delta L'_{leak}$ для манометрів з класом точності 0.1, 0.25 і 0.6 ($L = 1000$ м; $H_A = 40$ м)

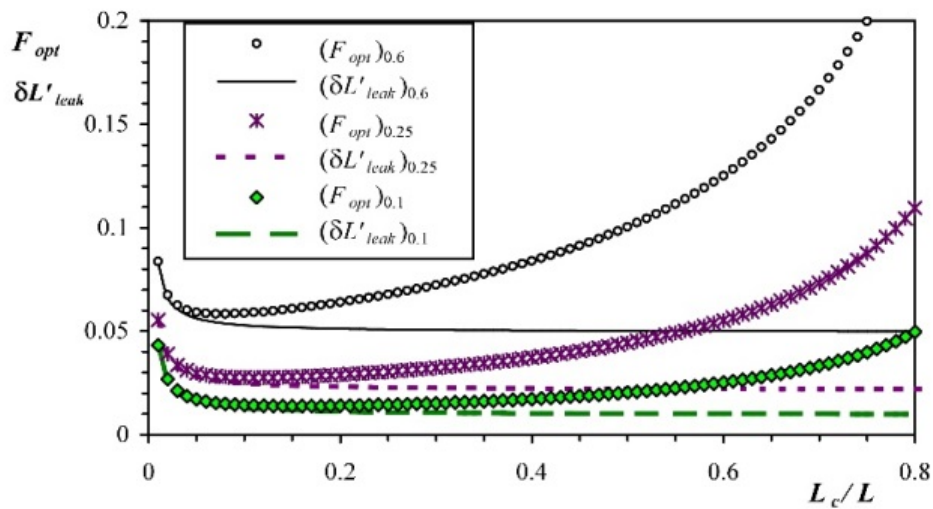


Рис. 3.5 Функція оптимізації F_{opt} , відповідні похибки локалізації прихованого витоку $\delta L'_{leak}$ для манометрів з класом точності 0.1, 0.25 і 0.6 ($L = 1500$ м; $H_A = 40$ м)

Мінімальні значення функції оптимізації у всьому діапазоні значень вхідних параметрів знаходяться в першій чверті довжини ділянки, помітно зміщуючись у напрямку початку ділянки зі зростанням класу точності

манометрів. Криві функції оптимізації демонструють плавне зростання у правих частинах графіків, з різким зростанням F_{opt} при $L_C / L \rightarrow 0$. Відповідні графіки відносної похибки локалізації прихованого витoku демонструють криві з максимумом при $L_C / L \rightarrow 0$, після чого відбувається спочатку різке, а потім поступове асимптотичне наближення до мінімально можливих значень на кінці ділянки.

Значення відносних похибок локалізації у точках мінімуму функції оптимізації лише трохи перевищують відповідні мінімальні допустимі значення, що відображає компроміс між точністю локалізації та ймовірністю виявлення прихованого витoku з першої спроби. Відповідні відносні похибки локалізації сильно корелюють з класом точності манометрів, що вказує на ефективність методу гідравлічного градієнта лише при використанні манометрів з класом точності 0.1 або 0.25.

Оптимальні параметри розташування контрольного перерізу C , базовані на трьох визначальних вхідних параметрах, а саме довжині L (м), класі точності A_C та напорі H_A , наведено в таблиці 3.1. Збільшення класу точності A_C зміщує оптимальне розташування контрольного перерізу C ближче до початку ділянки. Відповідно, відносні похибки локалізації витoku суттєво зростають: у 1,83–2,11 рази при порівнянні $A_C = 0.25$ і $A_C = 0.1$, а також у 3,72–4,65 рази при порівнянні $A_C = 0.6$ і $A_C = 0.1$.

Збільшення довжини ділянки з 500 м до 1500 м також зміщує оптимальну контрольну точку ближче до початку ділянки, при цьому зменшуючи відносну похибку локалізації на 18,4–19,8% для $A_C=0,1$, на 12,0–12,4% для $A_C=0,25$, і на 7,5–7,6% для $A_C=0,6$. Збільшення напору в початковій точці ділянки з 20 м до 60 м призводить до дуже незначного збільшення оптимальної відстані до контрольної точки, тоді як відповідні похибки локалізації зменшуються на 10,0–11,5%.

Таким чином, метод гідравлічного градієнта є одним з найпростіших інструментальних методів виявлення прихованих витоків з водопровідних мереж. Цей метод є найбільш ефективним для остаточної локалізації витoku

після встановлення факту витoku на ділянці загальним моніторингом гiдравлічних параметрів мережі. Аналіз структури результуючої похибки визначення координат місця прихованого витoku вказує на переважаючий вплив похибок визначення надлишкового тиску в характерних перерізах, що вимагає використання високоточних приладів з класом точності не більше 0,25. Отримано залежність відносної похибки локалізації прихованого витoku за методом гiдравлічного градієнта від параметрів ділянки водопроводу та витoku, а також від похибок інструментального вимірювання основних вхідних параметрів.

Таблиця 3.1. Оптимальні відстані до контрольної точки та відносні похибки локалізації витoku.

Довжина ділянки L , м	Напір H_A , (м)	$A_C=0,1\%$		$A_C=0,25\%$		$A_C=0,6\%$	
		L_C/L	$\delta L'$, %	L_C/L	$\delta L'$, %	L_C/L	$\delta L'$, %
500	20	0,220	1,605	0,168	2,939	0,121	5,968
	40	0,228	1,484	0,171	2,827	0,122	5,861
	60	0,231	1,443	0,172	2,789	0,123	5,820
1000	20	0,173	1,389	0,127	2,688	0,090	5,647
	40	0,179	1,274	0,130	2,577	0,091	5,540
	60	0,182	1,235	0,131	2,540	0,091	5,507
1500	20	0,148	1,309	0,108	2,587	0,075	5,521
	40	0,154	1,195	0,110	2,479	0,076	5,415
	60	0,156	1,158	0,111	2,443	0,076	5,381

3.2. Статистично-гідравлічний метод локалізації витоків

Розглянемо найпростішу, лінійну задачу аналітичної локалізації точки розташування одиничного, прихованого витoku на ділянці напірної водопровідної мережі (рис. 3.6). Вважаємо, що в результаті інструментальних вимірювань відомі: довжина та внутрішній діаметр на ділянці 1–2, позначки осі труби на початку та в кінці ділянки, об'ємні витрати води в перерізах 1 та 2 (рис. 3.6).

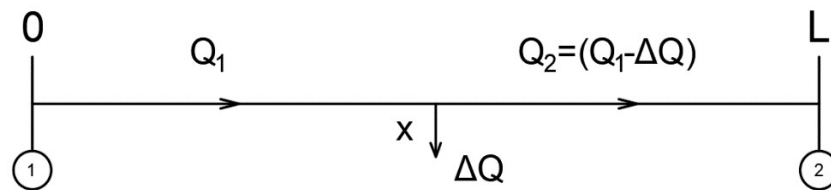


Рис. 3.6. Принципова гідравлічна схема для моделювання односточкового витoku на ділянці трубопроводу (лінійна задача про витік)

Рівняння Бернуллі для перерізів 1–1 та 2–2, розташованих на початку та в кінці розрахункової ділянки:

$$\left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right) = h_w, \quad (3.23)$$

де z – питома (віднесена до одиниці ваги) потенціальна енергія положення, яка залежить від положення центру ваги перерізу над площиною порівняння, м;

$\frac{p}{\gamma}$ – питома потенціальна енергія тиску, яка залежить від тиску води у центрі ваги перерізу, м;

$\frac{\alpha V^2}{2g}$ – питома кінетична енергія, м;

α – коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу місцевих швидкостей по живому перерізу потоку, м;

h_w – втрати напору, м.

З іншого боку, згідно з рівнянням Дарсі-Вайсбаха загальні втрати напору на ділянці 1–2 можуть бути визначені як сума втрат напору на окремих частинах цієї ділянки, що характеризуються різними витратами Q_1 та Q_2 (рис. 3.6). Приймаючи місцеві втрати напору такими, що дорівнюють 10% від втрат напору по довжині [3]:

$$h_w = \frac{8,8\lambda_1 x Q_1^2}{\pi^2 g D^5} + \frac{8,8\lambda_2 (L-x) Q_2^2}{\pi^2 g D^5} \quad (3.24)$$

де Q_1 , Q_2 – об’ємна витрата води в перерізах 1–1 і 2–2 відповідно, м³/с; L – довжина ділянки трубопроводу, м; x – відстань від початку ділянки до місця витоку, м; D – діаметр трубопроводу, м; λ_1 , λ_2 – коефіцієнти гідравлічного тертя на першій та другій частинах дослідної ділянки відповідно.

Витрати на першій та другій частинах ділянки відрізняються на величину витрати витоку ΔQ :

$$Q_2 = (Q_1 - \Delta Q) \quad (3.25)$$

Тоді втрати напору на ділянці:

$$h_w = \frac{8,8}{\pi^2 g D^5} [\lambda_1 x Q_1^2 + \lambda_2 (L-x) (Q_1 - \Delta Q)^2] \quad (3.26)$$

що після перетворень дає:

$$\pi^2 g D^5 h_w / 8,8 = [\lambda_1 x Q_1^2 + \lambda_2 L (Q_1 - \Delta Q)^2 - \lambda_2 x (Q_1 - \Delta Q)^2], \quad (3.27)$$

$$[\lambda_1 Q_1^2 - \lambda_2 (Q_1 - \Delta Q)^2] x = \pi^2 g h_w D^5 / 8,8 - \lambda_2 L (Q_1 - \Delta Q)^2. \quad (3.28)$$

Таким чином, розрахункове значення координати точки витоку x :

$$x = \frac{\pi^2 g D^5 h_w / 8,8 - \lambda_2 L (Q_1 - \Delta Q)^2}{\lambda_1 Q_1^2 - \lambda_2 (Q_1 - \Delta Q)^2} \quad (3.29)$$

або

$$x = \frac{\pi^2 g D^5 h_w / 8,8 - \lambda_2 L Q_2^2}{\lambda_1 Q_1^2 - \lambda_2 Q_2^2} \quad (3.30)$$

де коефіцієнти гідравлічного тертя:

$$\lambda_1 = f(Q_1); \lambda_2 = f(Q_1 - \Delta Q) \quad (3.31)$$

Коефіцієнти гідравлічного тертя λ_1 та λ_2 при турбулентному режимі течії на обох частинах ділянки з наявним прихованим витоком у загальному випадку залежать від відносної шорсткості труб та від значень критерію Рейнольдса.

Відносна шорсткість:

$$\varepsilon = \frac{\Delta_e}{D} \quad (3.32)$$

Критерій Рейнольдса для напірних потоків у водопровідних трубах:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad (3.33)$$

Таким чином, координата витоку X є функцією 11 розмірних вхідних параметрів:

$$X = F(z_1; z_2; p_1; p_2; \gamma; L; D; \Delta_e; Q_1; Q_2; \nu), \quad (3.34)$$

де z_1, z_2 – геометричний напір;

p_1, p_2 – надлишковий тиск;

γ – питома вага рідини;

L – довжина ділянки трубопроводу;

D – діаметр трубопроводу;

Δ_e – еквівалентна шорсткість труб;

Q_1, Q_2 – об'ємна витрата води;

ν – кінематична в'язкість рідини.

З використанням π -теореми Бекінгема кількість невідомих параметрів можна зменшити на кількість основних незалежних одиниць вимірювання M розмірних величин, що входять у (3.34). Оскільки $M=3$ (кг, м, с), то відносна координата точки витоку X/L у загальному випадку є функцією 8 безрозмірних комплексів:

$$X/L = F(I; \Delta_e/D; \Delta Q/Q; Re_1; Re_2; Eu; \omega_o/\omega_{tr}) \quad (3.35)$$

3.3. Вплив коефіцієнта гідравлічного тертя на похибки локалізації

3.3.1. Розрахункові залежності для коефіцієнта гідравлічного тертя

Найбільш точними і загальноприйнятими формулами для визначення коефіцієнту гідравлічного тертя вважаються: формула Прандтля (3.35) для гладких труб, формула Кармана (3.36) для повністю шорстких труб та універсальна формула Колбрука-Вайта (3.37):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \left(\frac{\text{Re} \sqrt{\lambda}}{2.51} \right), \quad (3.35)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \log \left(\frac{3.7D}{K} \right) \quad (3.36)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left(\frac{2.5}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{\Delta_e}{3.7D} \right) \quad (3.37)$$

де λ – коефіцієнт гідравлічного тертя;

Re – число Рейнольдса, безрозмірна величина, що визначає режим течії рідини (ламінальний або турбулентний);

D – внутрішній діаметр труби, м;

Δ_e – еквівалентна шорсткість труби або середня по площі висота нерівностей на внутрішній поверхні труби, м.

Формули (3.35) і (3.37) є неявними, що не становить проблеми при разових задачах, а при високошвидкісній автоматизації розрахунків в режимі реального часу становить суттєву технічну проблему.

В літературі запропоновано багато явних рівнянь, наприклад степенева формула Альтшуля (3.38), чи формули (3.39), (3.40) з ДБН В.2.5-74:2013, які є більш зручними для проведення розрахунків, проте не такими точними, а формули з ДБН виходять не стільки з максимально точного визначення коефіцієнта тертя, а скільки з позицій проектно-технічних з врахуванням об'ємів.

$$\lambda = 0.11 \left(\Delta_e / D + 68 / \text{Re} \right)^{0.25} \quad (3.38)$$

$$\lambda = A_1 (A_0 + B_0 d / \text{Re})^m / d^m = A_1 \times (A_0 + C / \nu)^m / d^m \quad (3.39)$$

де λ – коефіцієнт гідравлічного опору визначається за формулою:

$$\lambda = A_1(A_0 + B_0 d / \text{Re})^m / d^m = A_1 \times (A_0 + C / v)^m / d^m \quad (3.40)$$

де d – внутрішній діаметр труб, м;

V – середня швидкість руху води, м/с;

G – прискорення сили падіння, м/с²;

ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості рідини, яка транспортується, м²/с;

$$\text{Re} = \frac{V \cdot d}{\nu} - \text{число Рейнольдса}; \quad (3.41)$$

$$B_0 = \frac{C \text{Re}}{\nu \cdot d} - \text{додатковий параметр}; \quad (3.42)$$

Точнішою за інші, наведені в літературі явні формули, вважається формула Холанда (3.43), який поєднав формулу Колбрука-Вайта з формулою Прандтля, та сформував явну універсальну формулу для визначення коефіцієнта гідравлічного тертя, дійсну в усіх областях гідравлічного опору турбулентного режиму:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -1,8 \log \left(\frac{6,9}{\text{Re}} + \left(\frac{\Delta_e}{3,7D} \right)^{1,11} \right) \quad (3.43)$$

3.3.2. Порівняльний аналіз похибок визначення коефіцієнта гідравлічного тертя за різними залежностями

Проведено розрахунок визначення похибок коефіцієнта гідравлічного тертя, для напірних течій у водопровідних трубах, за різними методами, та для різних матеріалів трубопроводів.

3.3.2.1 Похибки визначення коефіцієнта тертя для ненових сталевих труб з відносною шорсткістю $\Delta/D = 0,01$

Еталонну криву на графіку представляє залежність Колбрука – Вайта. Ця формула є загальновизнаною у світовій інженерній практиці завдяки своїй здатності враховувати як вплив числа Рейнольдса, так і шорсткість внутрішньої поверхні труб. Її крива плавно спадає при зростанні Re , відображаючи поступове зменшення опору при збільшенні турбулентності, а

також характеризується типовим «згладженим вигином» у зоні переходу між гідравлічно-гладким і шорстким режимами течії.

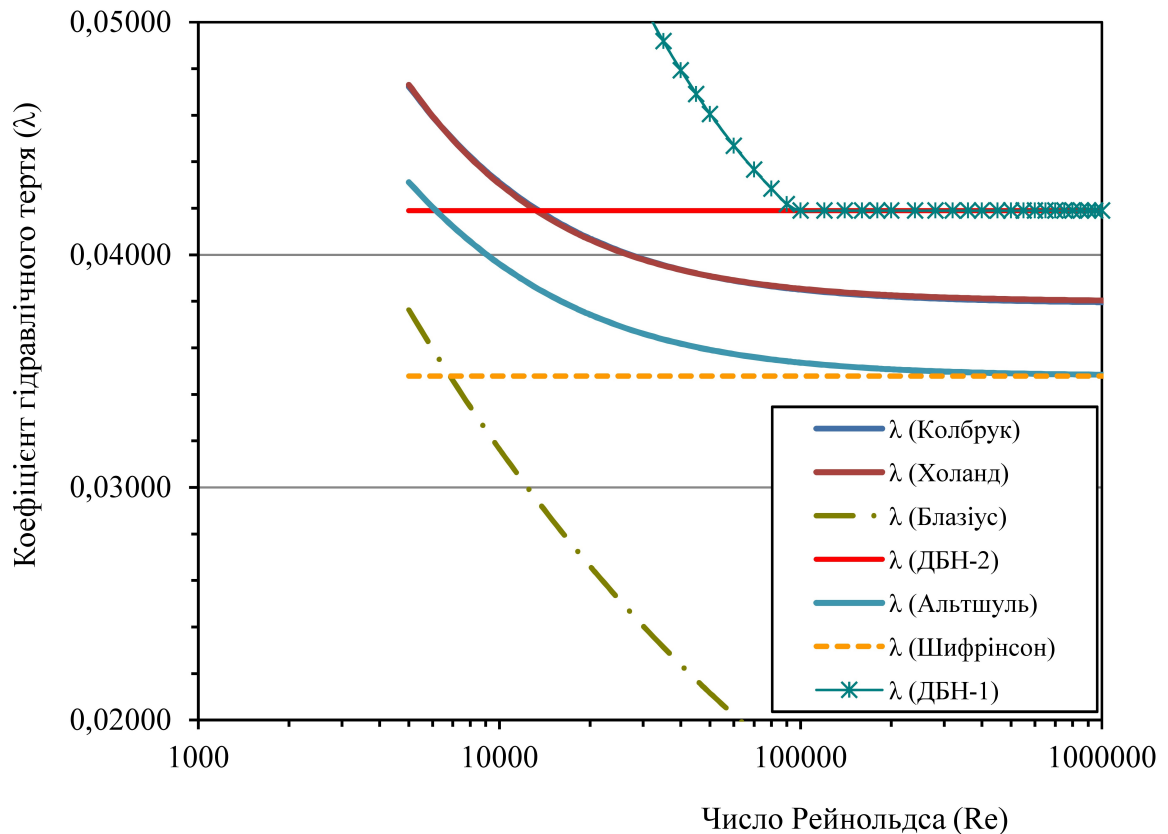


Рис. 3.7. Суміщений графік залежності коефіцієнта гідравлічного тертя від критерію Рейнольдса для неових сталевих труб $D=100$ мм з відносною шорсткістю $\Delta\epsilon/D = 0,01$ за різними залежностями.

Дуже близько до цієї кривої проходить залежність, розрахована за формулою Холанда. Попри свою просту аналітичну форму, ця формула надзвичайно точно апроксимує розрахунки Колбрука – Вайта, що чітко видно з графіка. Вона дає майже ідентичні значення λ в усьому діапазоні числа Рейнольдса, зберігаючи аналогічну форму кривої. Це робить її надзвичайно ефективною для практичного використання, оскільки вона поєднує точність і обчислювальну зручність.

Формула Альтшуля, ще одна з апроксимацій, дає результати, що загалом близькі до Колбрука – Вайта, особливо в середньому діапазоні Re , хоча при

дуже високих значеннях починається певне розходження, що проявляється у трохи менш крутому спаданні кривої. Водночас ця формула залишається прийнятною для інженерних розрахунків завдяки своїй простоті.

Крива, побудована за формулою Блазіуса, має помітно інший характер. Вона демонструє різке зниження λ при зростанні Re , однак розташована значно нижче інших кривих, що свідчить про ігнорування ефекту шорсткості. Така поведінка є характерною для ідеалізованих гладких труб, тому формула Блазіуса не може бути застосована для реальних умов із шорсткими стінками.

Лінія, що відповідає формулі Шифрінсона, є майже горизонтальною, не реагуючи на зміну числа Рейнольдса. Така поведінка вказує на слабку залежність формули від режиму течії, що, очевидно, не відображає фізичної природи процесу. Це суттєво обмежує її застосування.

Найбільш відмінними є криві, побудовані за нормативними формулами з ДБН. Одна з них представлена як фіксоване значення (ДБН-1), яке не змінюється із ростом Re , демонструючи завищений, постійний коефіцієнт тертя, ймовірно з урахуванням значного запасу на надійність. Інша (ДБН-2) лише частково враховує зміну режиму течії, однак також завищує втрати, уникаючи реалістичної деталізації.

Загалом графік чітко демонструє перевагу формули Холанда як оптимального компромісу між точністю та простотою. Вона майже ідеально відтворює поведінку еталонної формули Колбрука – Вайта і є найбільш ефективною з усіх представлених варіантів для проведення розрахунків.

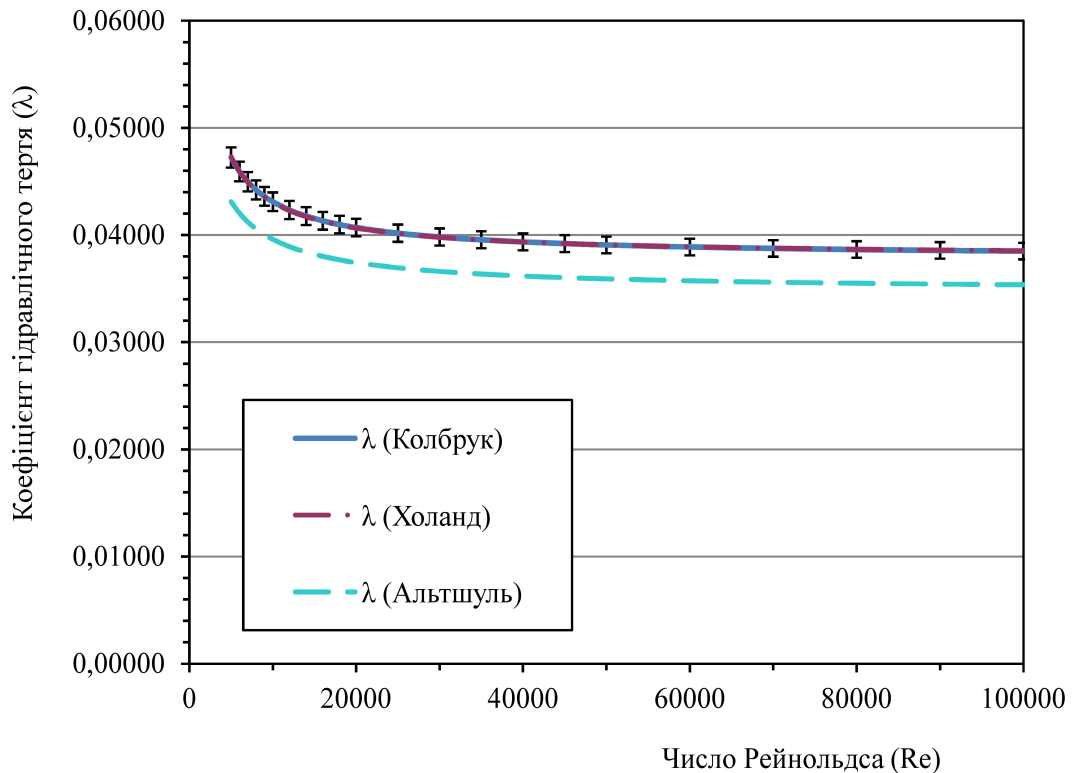


Рис. 3.8. Порівняння графіків залежності коефіцієнта гідравлічного тертя від критерію Рейнольдса для ненових сталевих труб $D=100$ мм з відносною шорсткістю $\Delta\epsilon/D = 0,01$ за найточнішими методами

На рис. 3.8 засічками показано відхилення від результатів за формулою Колбрука-Вайта $\pm 5\%$. Для відносної шорсткості $\Delta/D = 0,01$ формула Альтшуля дає відносну похибку більшу за $5,0\%$, що вже є критичним для реалізації гідравлічних методів локалізації витоків. З іншого боку, коефіцієнти гідравлічного тертя за рівнянням Холанда відрізняються від відповідних значень за формулою Колбрука – Вайта майже на порядок менше, в межах від $-0,52\%$ до $+0,37\%$.

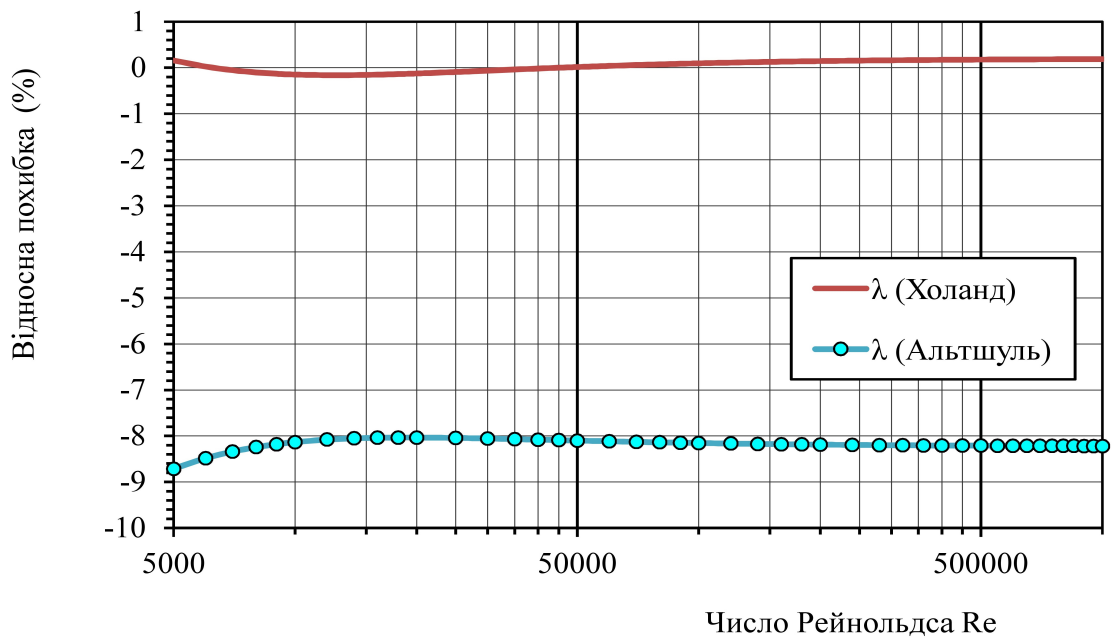


Рис. 3.9. Відносні похибки визначення коефіцієнта гідравлічного тертя за формулами Холанда та Альтшуля відносно рівняння Колбрука – Вайта та для ненових сталевих труб з відносною шорсткістю $\Delta_c/D = 0,01$

Протягом усього діапазону Re похибка формули Холанда не перевищує приблизно 0,3%, зберігаючи стабільну точність. Це підтверджує її високу ефективність і достовірність як заміни для формули Колбрука – Вайта в розрахунках.

Позначення, що відповідають формулі Альтшуля, розташовані нижче, у межах від -9% до -8%. Вони демонструють систематичне заниження коефіцієнта тертя порівняно з еталоном, однак похибка залишається сталою та передбачуваною в усьому діапазоні числа Рейнольдса. Це дозволяє вважати формулу Альтшуля придатною для практичного використання, хоча й з обережністю щодо недооцінки втрат тиску. Загалом графік показує явну перевагу формули Холанда в контексті точності. Вона забезпечує найменшу похибку серед наближених методів і найбільш наближена до значень, розрахованих за формулою Колбрука-Вайта.

3.3.2.1 Похибки визначення коефіцієнта тертя для нових сталевих труб з відносною шорсткістю $\Delta/D = 0,001$

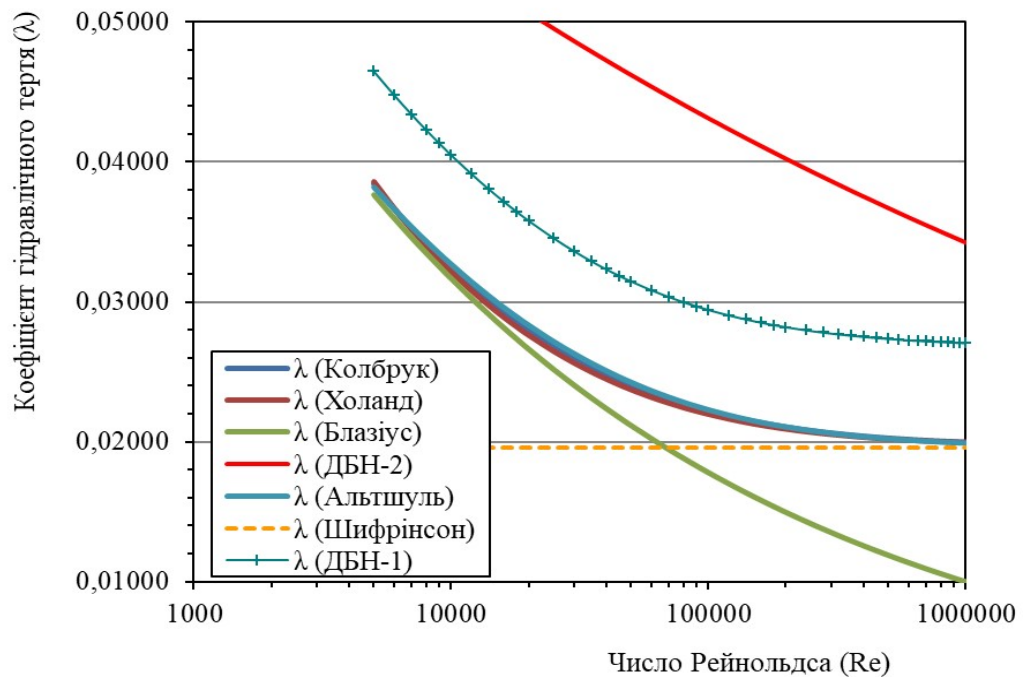


Рис. 3.10. Суміщений графік залежності коефіцієнта гідравлічного тертя від критерію Рейнольдса для нових сталевих труб $D=100$ мм з відносною шорсткістю $\Delta_e/D = 0,001$ за різними залежностями

Загальний аналіз графіків свідчить про наявність суттєвих розбіжностей між різними формулами визначення коефіцієнта гідравлічного опору. Формула Блазіуса, попри свою популярність, не враховує вплив шорсткості внутрішньої поверхні труби, що обмежує її застосування лише до гладких труб і турбулентного режиму при малих числах Рейнольдса. Формула Шифрінсона, хоча й базується на узагальнених емпіричних залежностях, не забезпечує достатньої точності в порівнянні з більш сучасними або фізично обґрунтованими підходами. Формули, закладені в ДБН, хоч і широко використовуються в нормативному проєктуванні, характеризуються значним запасом, що призводить до завищених значень втрат напору та не відповідає реальній поведінці потоку в трубах. У результаті з усього набору розглянутих рівнянь для подальших розрахунків доцільно обрати лише три формули.

Серед усіх розглянутих формул найкращі результати демонструє формула Колбрука-Вайта, яка вважається еталоном завдяки високій точності та здатності відображати поведінку потоку в трубах з будь-яким ступенем шорсткості. Однак вона є неявною, тобто для її розв'язання потрібні ітерації, що ускладнює її використання в оперативних розрахунках.

Найефективнішою альтернативою є формула Холанда, яка поєднує простоту аналітичного виразу з високою точністю. Вона є прямим наближенням до формули Колбрука – Вайта і дає практично ідентичні результати без потреби в ітераціях. Формула Альтшуля також показує високу точність і добре апроксимує результати Колбрука – Вайта, залишаючись при цьому простою для практичного використання.

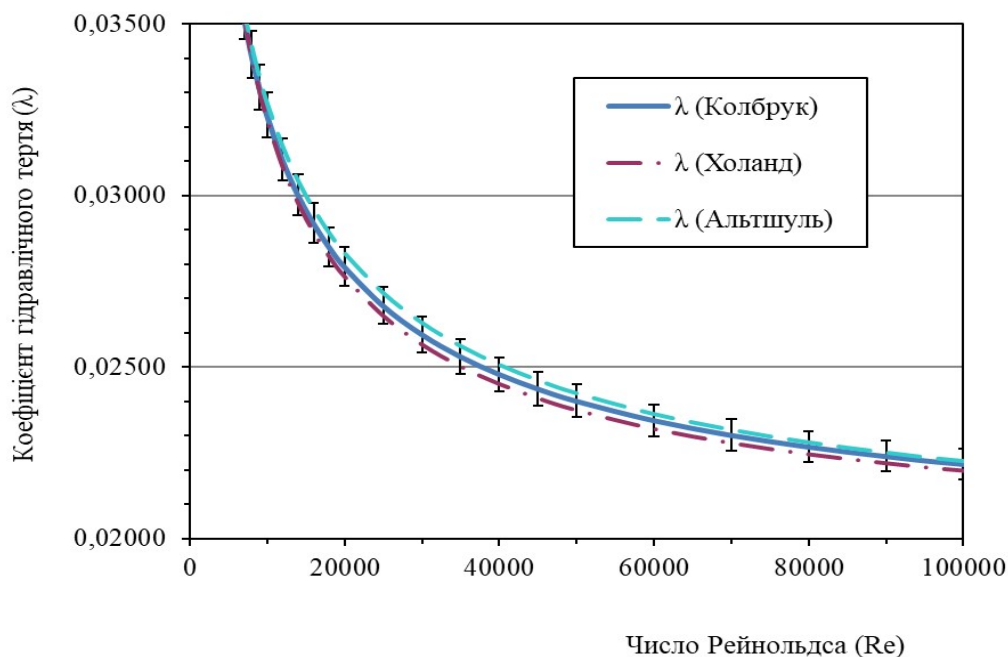


Рис. 3.11. Порівняння графіків залежності коефіцієнта гідравлічного тертя від критерію Рейнольдса для нових сталевих труб $D=100$ мм з відносною шорсткістю $\Delta_s/D = 0,001$ за найточнішими методами

На рис. 3.11 засічками показано відхилення від результатів за формулою Колбрука-Вайта $\pm 2\%$. Для відносної шорсткості $\Delta/D = 0,001$ формули Альтшуля та Холанда майже не відрізняються від відповідних значень за формулою Колбрука-Вайта, в межах від $-1,2\%$ до $+1,5\%$.

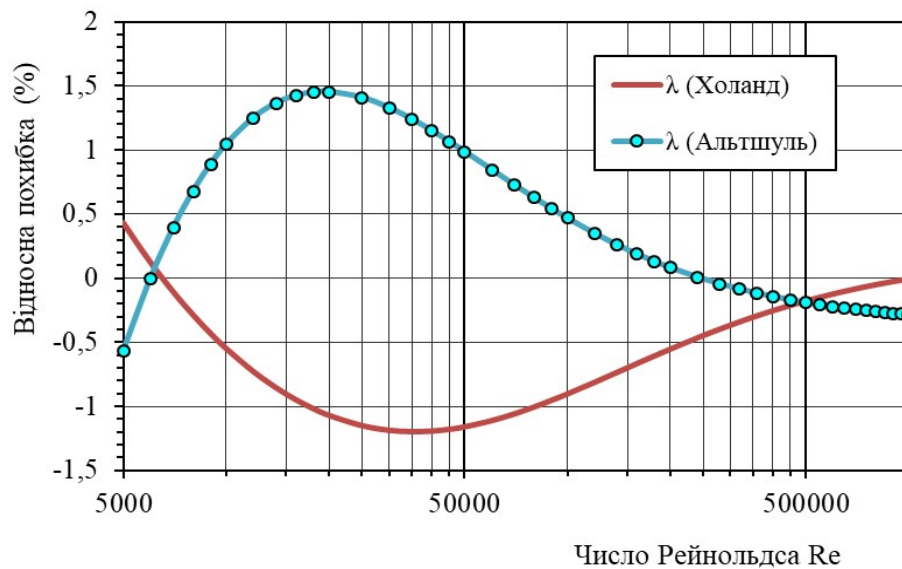


Рис. 3.12. Відносні похибки визначення коефіцієнта гідравлічного тертя за формулами Холанда та Альтшуля відносно рівняння Колбрука-Вайта для нових сталевих труб з відносною шорсткістю $\Delta\epsilon/D = 0,001$

3.3.2.1 Похибки визначення коефіцієнта тертя для пластмасових труб з відносною шорсткістю $\Delta/D = 0,0002$

Найбільш достовірним орієнтиром на графіку є крива, побудована за формулою Колбрука-Вайта. Вона відображає реалістичну залежність коефіцієнта тертя від Re з урахуванням шорсткості трубопроводу та демонструє характерне спадання λ при зростанні числа Рейнольдса.

Формула Холанда майже точно відтворює хід еталонної кривої. Вона плавно повторює спадання значень λ , і візуально збігається з формулою Колбрука – Вайта практично в усьому діапазоні. Крива Альтшуля також доволі близька до еталонної, хоча в зоні високих чисел Рейнольдса вона демонструє дещо менші значення λ , порівняно з формулою Колбрука-Вайта.

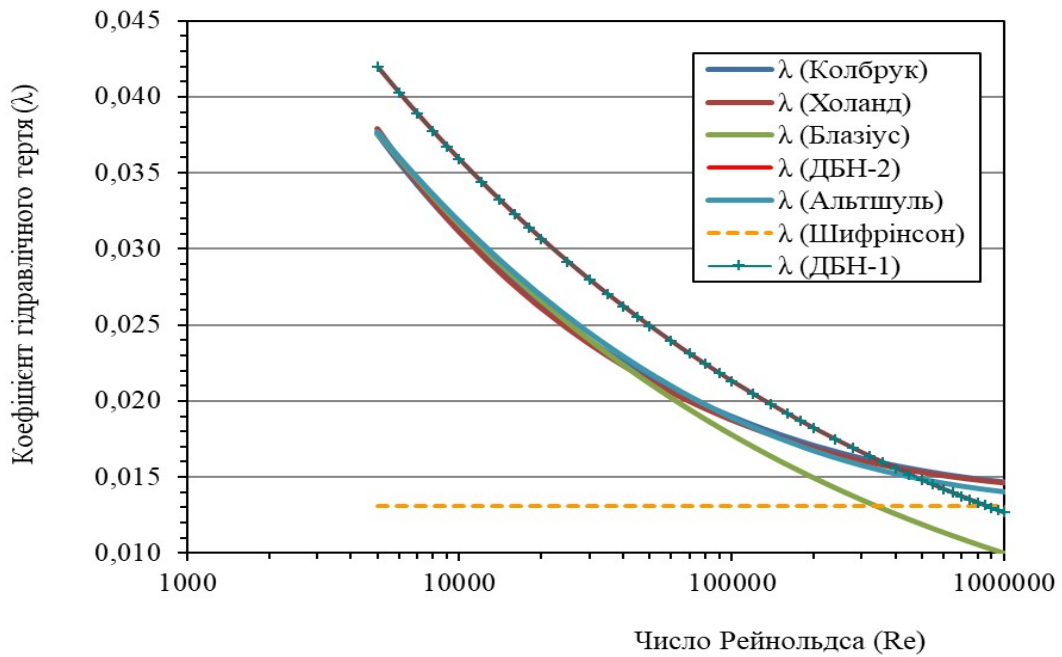


Рис. 3.13. Суміщений графік залежності коефіцієнта гідравлічного тертя від критерію Рейнольдса для пластмасових труб $D=100$ мм з відносною шорсткістю $\Delta\epsilon/D = 0,0002$ за різними залежностями

Формула Блазіуса очікувано показує більш різке зниження коефіцієнта тертя з ростом Re , однак проходить нижче інших кривих, особливо у верхній частині шкали. Це результат того, що формула не враховує шорсткість труб і призначена для гідравлічно гладких умов, що робить її недостатньо точною для реальних застосувань. Формули Шифрінсона та ДБН-1 істотно відрізняються від решти. Шифрінсон дає фіксоване значення λ , що не змінюється з ростом Re , тобто не враховує зміну режиму течії, що суперечить фізичній природі турбулентного потоку. Подібну поведінку демонструє й крива ДБН-1, яка задає сталу, значно завищену величину λ , очевидно з метою нормативного резервування втрат. Натомість формула ДБН-2 виглядає більш реалістичною: вона змінюється залежно від Re , але залишається помітно вище еталонної кривої, що свідчить про навмисне підвищення коефіцієнта тертя для підстрахування проєктних розрахунків.

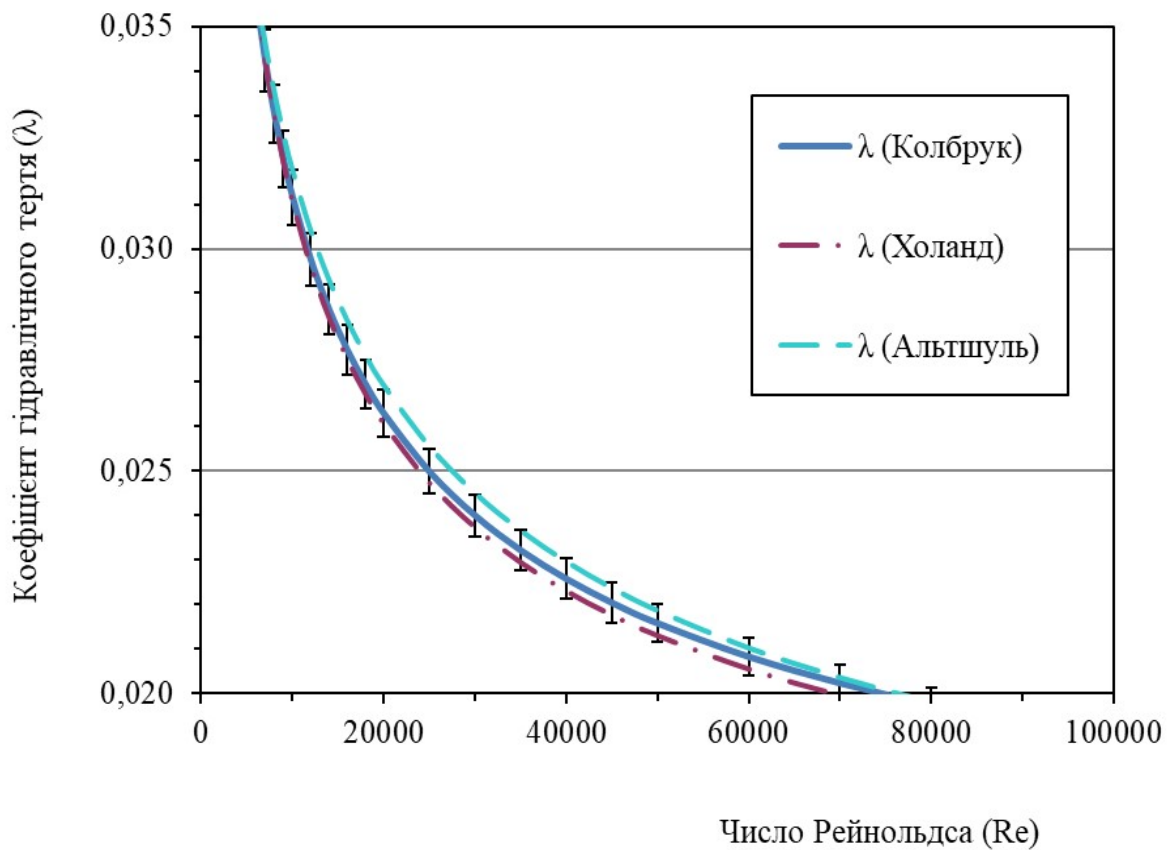


Рис. 3.14. Порівняння графіків залежності коефіцієнта гідравлічного тертя від критерію Рейнольдса для пластмасових труб $D=100$ мм з відносною шорсткістю $\Delta\epsilon/D = 0,0002$ за найточнішими методами

На рис. 3.14 засічками показано відхилення від результатів за формулою Колбрука – Вайта $\pm 2\%$. Для відносної шорсткості $\Delta/D = 0,0002$ формула Альтшуля дає відносну похибку більшу за $2,0\%$, що вже є критичним для реалізації гідравлічних методів локалізації витоків. З іншого боку, коефіцієнти гідравлічного тертя за рівнянням Холанда відрізняються від відповідних значень за формулою Колбрука-Вайта майже на порядок менше, в межах від $-1,35\%$ до $+0,82\%$.

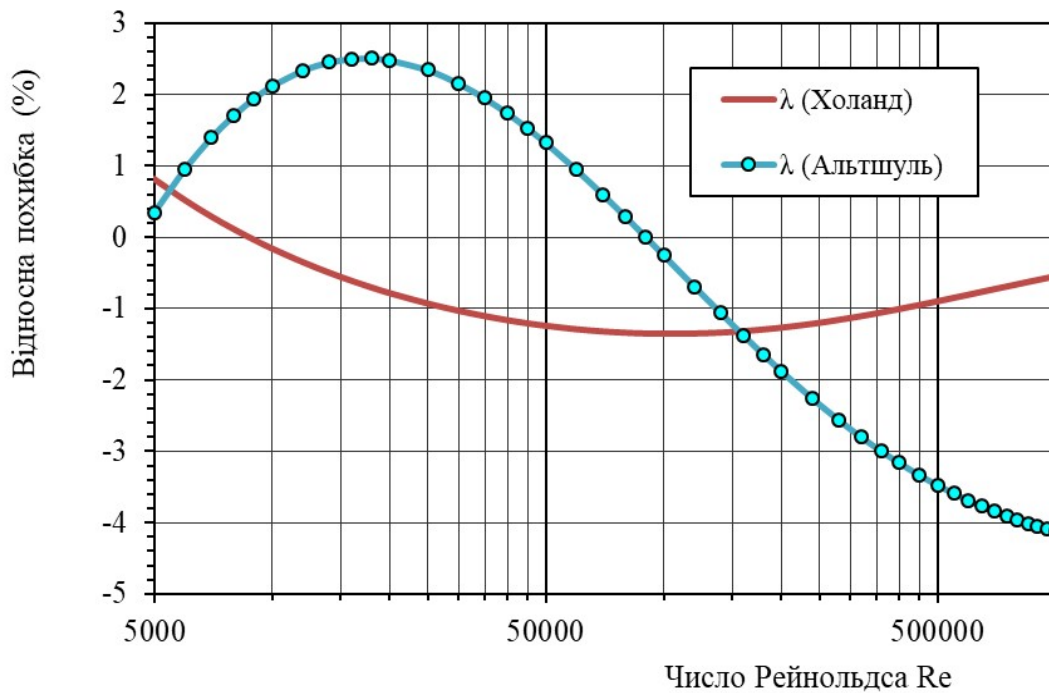


Рис. 3.15. Відносні похибки визначення коефіцієнта гідравлічного тертя за формулами Холанда та Альтшуля відносно рівняння Колбрука – Вайта для пластмасових труб з відносною шорсткістю $\Delta/D = 0,0002$

Крива, що відповідає формулі Холанда, є гладкою та стабільною. Вона показує відносну похибку в межах від $-1,5\%$ до трохи більше 1% , залежно від значення Re . Похибка спочатку зростає, досягаючи максимуму близько 1% при малих Re , після чого поступово зменшується і переходить у від’ємну зону, де значення λ стає трохи меншим за еталонне. Ця форма кривої вказує на те, що формула Холанда є дуже точною у широкому діапазоні Re , з незначними, систематичними відхиленнями, що залишаються у межах прийнятної інженерної похибки.

Позначення, що відповідають формулі Альтшуля, утворюють хвилеподібну криву. Вони демонструють спочатку зростання позитивної похибки до приблизно $+2,5\%$ при середніх значеннях Re (близько 30000 – 40000), після чого крива починає спадати, перетинає нульову вісь і в зоні високих чисел Рейнольдса переходить у від’ємні значення — до $-4,5\%$. Така поведінка свідчить про те, що формула Альтшуля переоцінює коефіцієнт тертя при менших Re і недооцінює при великих. Водночас ці коливання залишаються в межах $\pm 5\%$, що в багатьох практичних задачах є допустимим.

Загальний аналіз представлених графіків і порівняння різних формул для визначення коефіцієнта гідравлічного тертя дозволяє зробити виважений висновок щодо доцільності їх застосування в інженерних розрахунках. Еталоном точності виступає формула Колбрука – Вайта, яка найбільш повно враховує вплив як числа Рейнольдса, так і шорсткості внутрішньої поверхні труб. Усі інші формули оцінювались саме щодо неї як до референсного методу.

Серед наближених формул найкращу відповідність еталонним значенням демонструє формула Холанда. Вона поєднує високу точність з аналітичною простотою, не потребує ітерацій і забезпечує мінімальну відносну похибку — у межах $\pm 1\%$ практично в усьому досліджуваному діапазоні числа Рейнольдса. Саме тому її можна вважати найефективнішим інструментом для швидких і надійних гідравлічних розрахунків. Вона достатньо добре апробована та широко використовується в інженерній практиці [24,75] завдяки поєднанню точності та простоти.

Формула Альтшуля також показала прийнятні результати, хоча її похибка має хвилеподібний характер, із тенденцією до завищення коефіцієнта тертя при малих значеннях Re та заниження при високих. Незважаючи на це, відхилення лишається в межах до $\pm 5\%$, що дозволяє використовувати її в умовах, де допустимий дещо вищий рівень наближення.

Інші формули, зокрема Блазіуса, Шифрінсона та нормативні залежності з ДБН, не відповідають сучасним вимогам до точності. Блазіус не враховує шорсткість, Шифрінсон не змінюється з Re , а ДБН-залежності часто є надто консервативними, із закладеним запасом, що призводить до значного завищення втрат.

Таким чином, для практичних розрахунків доцільно використовувати формулу Холанда як основний інструмент. За потреби швидкої оцінки або в умовах обмеженого обсягу даних можна також застосовувати формулу Альтшуля. Інші методи можуть бути використані лише в контексті нормативного проєктування або як попереднє наближення, з розумінням їх обмежень.

3.4. Похибки локалізації прихованих витоків за статистично-гідравлічним методом

У цьому підрозділі представлено результати імітаційних чисельних експериментів з визначення відносної похибки аналітичної локалізації місця одиночного витоку з використанням описаного вище гідравлічного методу.

За методикою представленою у розділі 2, виконано систематичні теоретичні дослідження залежності приведеної похибки локалізації витоку та її стандартного відхилення від чотирьох вхідних параметрів: X/L – відносної координати витоку, Q – транзитної витрати, ω_0 – розміру отвору витоку, D – діаметру трубопроводу. При розрахунку імітованого витоку води обґрунтовано абсолютні або відносні похибки для кожного з 11 вхідних параметрів. Максимальні допустимі похибки визначення вхідних параметрів було прийнято за типовими характеристиками відповідних вимірювальних приладів (розділ 2), зокрема похибки визначення позначок осі трубопроводу на початку та в кінці ділянки прийнято рівними $\pm 0,01$ м, надлишкових тисків p_1 та $p_2 \pm 0,4\%$, довжини трубопроводу $\pm 0,5$ м, діаметру трубопроводу $\pm 0,7\%$, витрат води $\pm 2,5\%$, швидкостей $\pm 2\%$, температури $\pm 0,5$ °С, кінематичної в'язкості $\pm 2,0 \times 10^{-8}$ м²/с, еквівалентної шорсткості $\pm 0,03$ мм.

3.4.1. Вплив відносної координати витоку

Проаналізовано вплив відносної координати витоку, на приведену похибку локалізації, та її стандартне відхилення, для центрального зрізу матриці планування (табл. 3.1, рис. 3.16).

Таблиця 3.2 – Вплив відносної координати витоку X/L на середню похибку його локалізації $\epsilon_{X,\text{mid}}$ та її стандартне відхилення STD_ϵ (при $\Delta Q/Q_I=0,04$; $Q_I=100$ л/с; $\omega_0=2,72$ см²; $D=311$ мм; $p_I=300000$ Па)

№ серії	x/L	$\epsilon_{X,\text{mid}}$ (%)	STD_ϵ (%)
1	0,1	-0,38	0,201
2	0,3	-0,075	0,177
3	0,5	0,279	0,175
4	0,7	0,346	0,169
5	0,9	0,61	0,121

Отримано незначний, але систематичний вплив відносної координати точки витoku на середню приведену похибку його локалізації за статистично-гiдравлiчним методом. Збiльшення X/L вiд 0,1 до 0,9 зумовлює вiдповiдне зростання приведенiї похибки вiд -0,38% до +0,61%, а вiдповiдна залежнiсть близька до лiнiйної та описується лiнiєю тренду:

$$\varepsilon_{x.mid} = -0,556 + 1,86X / L - 0.659(X / L)^2 \quad (3.44)$$

Показник STD_{ε} навпаки незначно зменшується зi збiльшенням X/L вiд 0,20% до 0,12%, а вiдповiдна залежнiсть є лiнiйною:

$$STD_{\varepsilon} = -0,211 - 0,084X / L \quad (3.45)$$

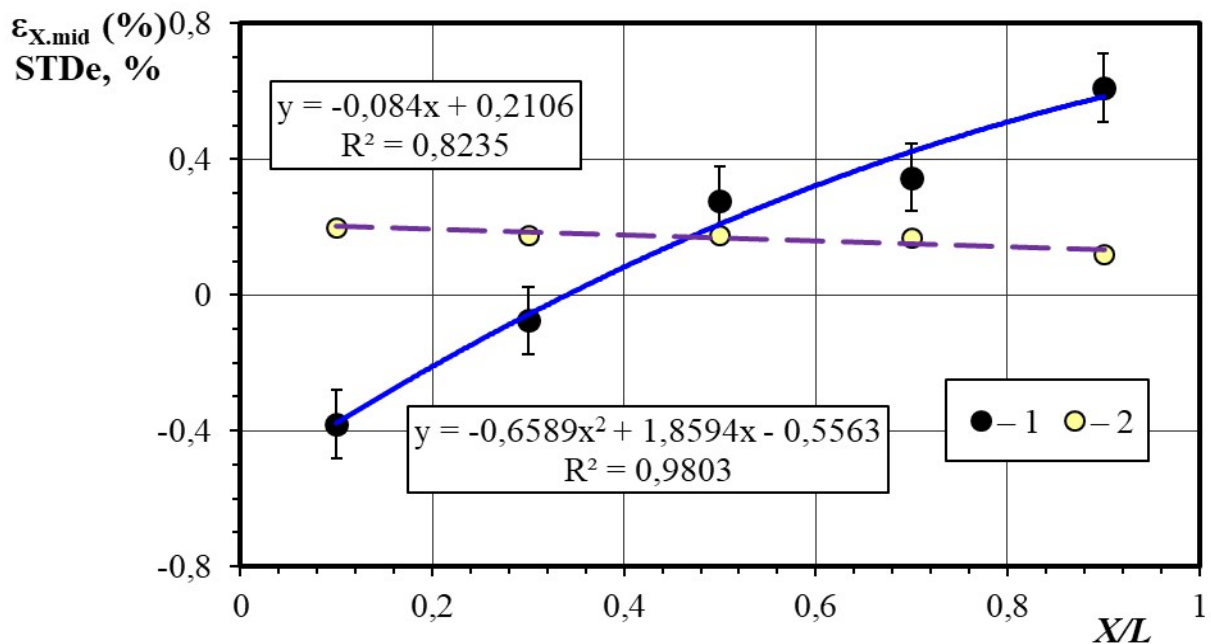


Рис. 3.16. Вплив відносної координати витoku x/L на середню приведену похибку його локалізації $\varepsilon_{x.mid}$ (1) та її стандартне відхилення STD_{ε} (2)

Отримані лiнiї тренду (3.16) та (3.17) доцiльно використовувати для автоматичної кореляцiї систематичної похибки пропонованого методу, зумовленою вiдносною локалiзацiєю витoku на дiлянцi водопроводу.

3.2.2. Вплив транзитної витрати

Проаналізовано вплив транзитної витрати витоку, на приведену похибку локалізації, та її стандартне відхилення, для центрального зрізу матриці планування.

Таблиця 3.3 – Вплив транзитної витрати витоку на похибку його локалізації (для, $x/L=0,5$; $w_o=2,72 \text{ см}^2$; $D=311 \text{ мм}$; $p_1= 300000 \text{ Па}$)

№ досліду	Q (л/с)	$\epsilon_{X,\text{mid}}$ (%)	STD (%)
1	100	0.279	0.175
2	50	0.058	0.278
3	33.3	0.045	0.407
4	25	-0.169	0.688
5	20	0.339	1.141
6	8	-1.431	0.61

де Q – витрата рідини;

$\epsilon_{X,\text{mid}}$ – середня похибка визначення координати витоку;

STD – стандартне відхилення результатів.

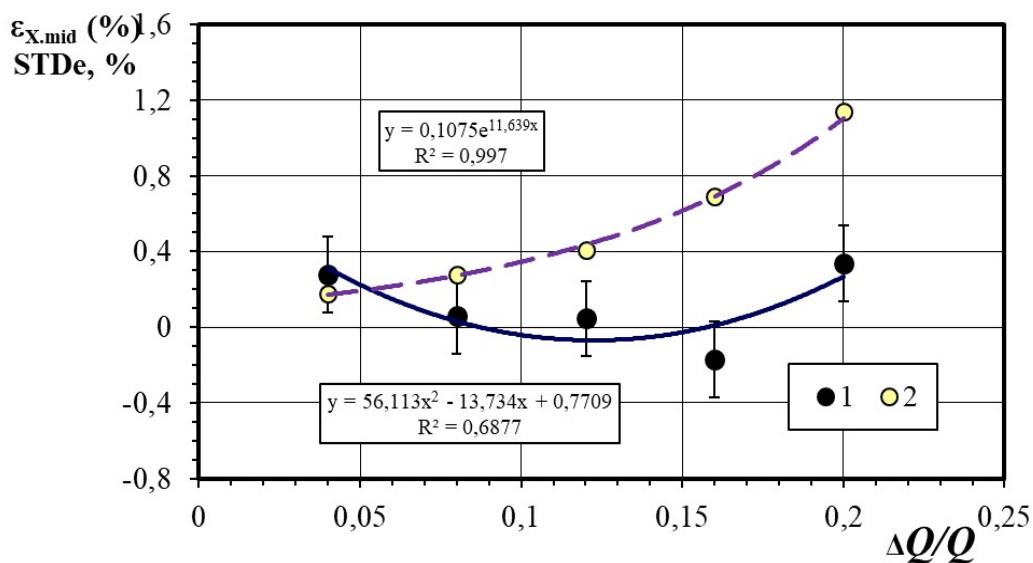


Рис. 3.17 Вплив транзитної витрати (Q) на величину приведеної похибки визначення координати X

Витрата води Q має незначний вплив на величину приведеної похибки визначення координати X , та варіюється в межах від -0,169 до 0,339%. Показник $\text{STD}\epsilon$ в межах до 1,2% та при збільшенні показника Q прямує до нуля (рис.3.17).

3.4.3. Вплив величини витоку

Проаналізовано вплив величини витоку, на приведену похибку локалізації, та її стандартне відхилення, для центрального зрізу матриці планування.

Таблиця 3.4 – Вплив величини витоку на похибку його локалізації
(для $Q=100$ л/с; $V1=1,316$ м/с; $D=311$ мм; $p1=300000$ Па)

№ досліду	ω_o (см ²)	$\epsilon_{X.mid}$ (%)	STD (%)
1	1	0.467	0.847
2	2	0.265	0.281
3	2.72	0.279	0.175
4	4	0.025	0.193
5	5	0.07	0.112

де ω_o – розмір отвору витоку;

$\epsilon_{X.mid}$ – середня похибка визначення координати витоку;

STD – стандартне відхилення результатів.

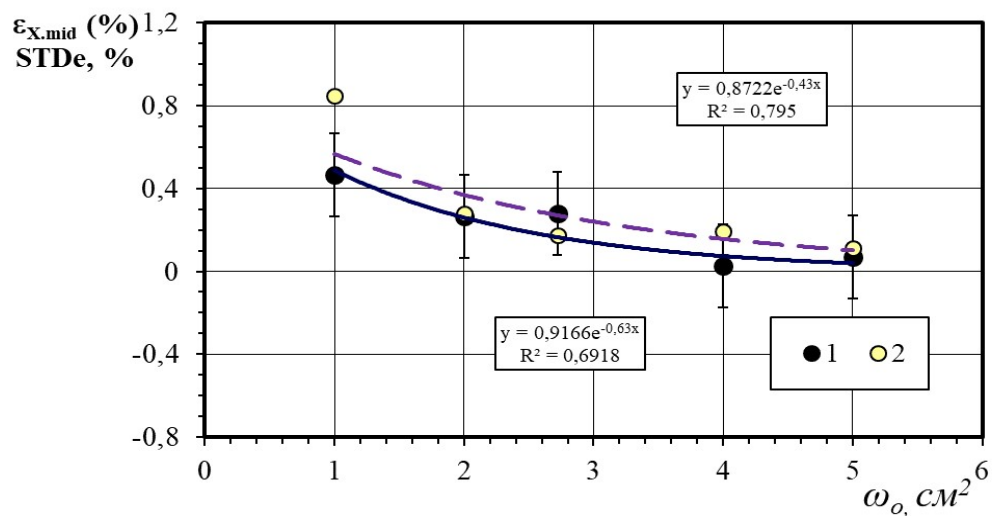


Рис. 3.18. Вплив величини площі витоку (W_o) на величину приведеної похибки визначення координати X

Площа свища (W_o) має незначний вплив на величину приведеної похибки визначення координати X, та варіюється в межах від -0,025 до 0,467%. Показник STD_e в межах до 0,847% та при збільшенні величини витоку прямує до нуля (рис.3.18).

3.4.4 Вплив діаметра трубопроводу на величину приведеної похибки визначення координати

Проаналізовано вплив діаметра трубопроводу, на приведену похибку локалізації витoku, та її стандартне відхилення, для центрального зрізу матриці планування.

Таблиця 3.5 – Вплив діаметра трубопроводу на похибку локалізації витoku (для $Q=100$ л/с; $w_o=2,72$ см²; $V_1=1,316$ м/с; $p_1=300000$ Па)

№ досліджу	D (м)	$\varepsilon_{X.mid}$ (%)	STD (%)
1	0,1	0,009	0,013
2	0,209	0,055	0,06
3	0,311	0,279	0,175
4	0,41	0,248	0,52
5	0,512	0,21	0,941

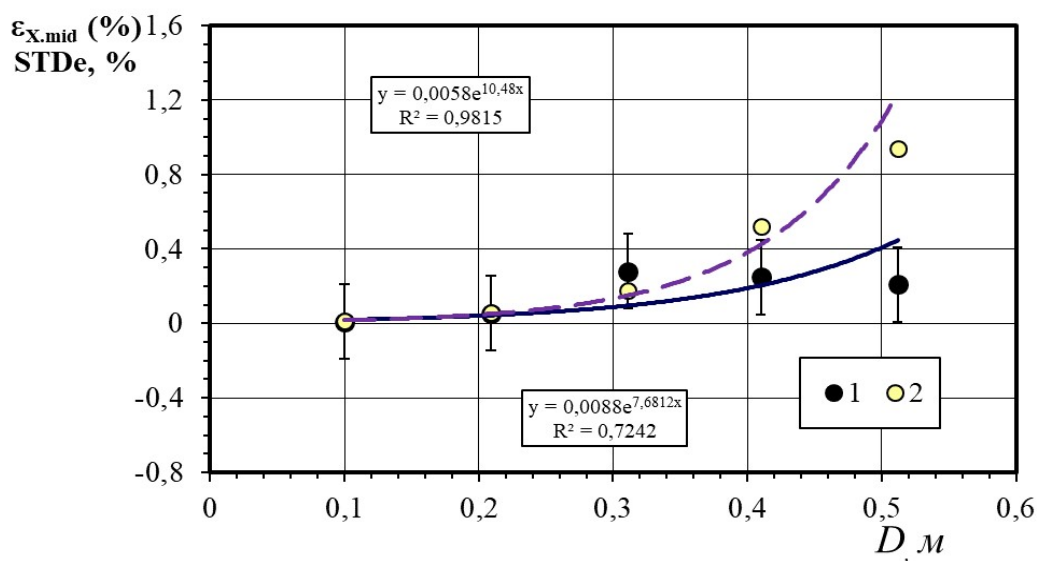


Рис. 3.19. Вплив діаметра трубопроводу D на величину приведеної похибки визначення координати X

Діаметр трубопроводу (D) має незначний вплив на величину приведеної похибки визначення координати X , та варіюється в межах від -0,009 до 0,279%. Показник $STD\varepsilon$ в межах до 0,941% проте при збільшенні діаметру трубопроводу збільшується (рис. 3.19).

3.5. Вплив зонування водопровідної мережі на пошук і локалізацію прихованих витоків

3.5.1. Зонування водопровідних мереж

Зонування водопровідних мереж (District Metered Areas, DMA) є ефективною стратегією управління та оптимізації роботи систем водопостачання. Одним із ключових аспектів такого зонування є можливість контролю і регулювання тиску в окремих зонах, що безпосередньо впливає на утворення та виявлення прихованих витоків.

Зв'язок між тиском у мережі та кількістю витоків

Багато досліджень та практичних спостережень демонструють, що вищий тиск у водопровідній мережі веде до більшого навантаження на стики, фітинги та старі труби, пришвидшеного розвитку мікротріщин у матеріалі труб, збільшення об'єму води, що втрачається через вже наявні дефекти.

Емпірична залежність між об'ємом витоку та тиском часто описується формулою:

$$Q = k \cdot p^n \quad (3.46)$$

де Q – об'ємна витрата води через витік, л/с;

p — надлишковий тиск у точці витоку, Па;

k — коефіцієнт, що залежить від розміру, форми та матеріалу витоку;

n — показник степеня, яка зазвичай лежить в межах від 0,5 до 2,5 (найчастіше 1,15...1,5).

Це означає, що навіть незначне зменшення тиску (напр., на 10–15%) може дати відчутне зниження втрат води (до 30%).

Вплив стабільного та високого тиску на виникнення витоків

У мережах із постійним високим тиском (наприклад, 5–6 бар) частіше виникають розриви труб через гідроудари та вібрації, хронічні мікровитоки, які довго залишаються невиявленими, підвищений рівень фонових втрат.

У зонах, де тиск знижено до оптимального (наприклад, 2.5–3.5 бар для житлових районів), кількість нових витоків значно зменшується, а тривалість служби труб зростає.

Зонування дозволяє:

- ізолювати ділянки з підозрілими показниками нічного мінімального споживання;
- вимірювати баланс подачі та споживання води в кожній зоні;
- скорочувати час пошуку місця витoku завдяки зменшенню масштабів обстеження.

Крім того, **динамічне керування тиском** (Pressure Management) у кожній зоні дозволяє не лише зменшити втрати, а й виявити витoki завдяки їхній реакції на зміну тиску (наприклад, витік може проявитися або змінити характеристики при зниженні чи підвищенні тиску).

Зниження тиску в зонах з високими втратами — ефективний засіб боротьби з витокami. Зонування покращує точність та швидкість виявлення витоків. Підтримка стабільного, оптимального тиску в зонах зменшує як кількість нових витоків, так і об'єм втрат через вже наявні дефекти. Найефективнішим підходом є комбінація зонування, контролю тиску та локального моніторингу витрат води.

3.5.2. Застосування статистично-гідравлічного методу для ліній зонованих (районованих) водопровідних мереж

Проаналізовано вплив тиску, на приведену похибку локалізації, та її стандартне відхилення, для центрального зрізу матриці планування (табл. 3.6, рис. 3.20).

Отримано незначний, але систематичний вплив тиску на середню приведену похибку його локалізації за статистично-гідравлічним методом. Збільшення P від 200000 до 600000 демонструє незначний, але систематичний вплив на середню приведену похибку локалізації витoku $\varepsilon_{X.mid}$ та її стандартне відхилення STD_{ε} . Із підвищенням тиску в системі спостерігається загальна тенденція до зменшення середньої похибки. Так,

при збільшенні тиску з 200 000 до 600 000 Па значення $\epsilon_{X.mid}$ змінюється в межах від 0,6 % до 0,53 %, що свідчить про підвищення точності локалізації при вищому тиску

Таблиця 3.6 – Вплив тиску P на середню похибку його локалізації $\epsilon_{X.mid}$ та її стандартне відхилення STD_{ϵ} ($\Delta Q/Q_I=0,04$; $Q_I=100$ л/с; $\omega_o=2,72$ см²; $D=311$ мм)

№ серії	P (Па)	$\epsilon_{X.mid}$ (%)	STD (%)
1	200000	0,6	-0,09
2	300000	0,86	0.03
3	500000	0,56	0.19
4	600000	0,53	0.01

Значення стандартного відхилення також демонструють певні варіації, однак коливаються у вузьких межах. Найбільше відхилення спостерігалось при тиску 500 000 Па (0,19 %), що може вказувати на локальну чутливість моделі при зміні режимів. Проте в цілому значення **STD_{ϵ}** залишаються близькими до нуля, що свідчить про стабільність результатів.

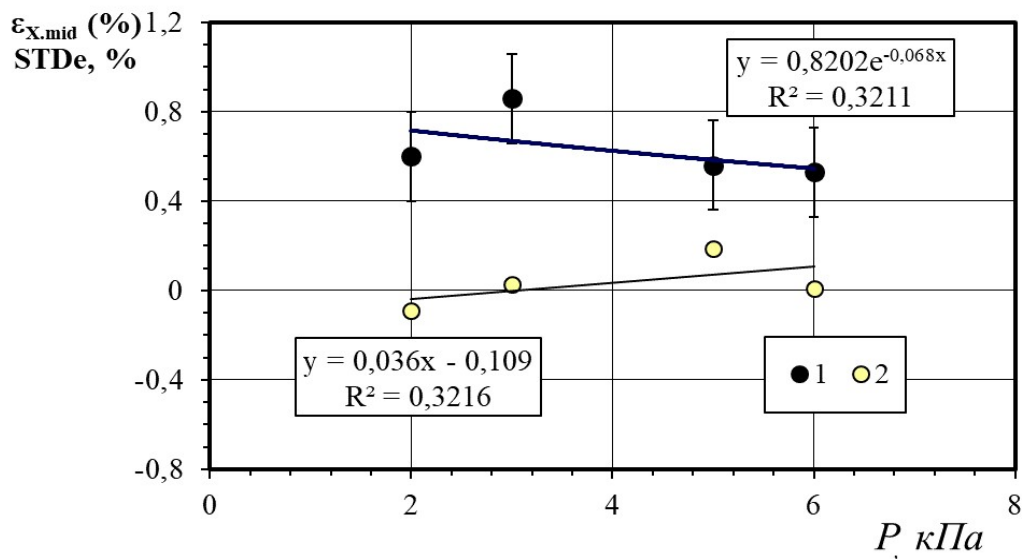


Рис. 3.20. Вплив тиску P на середню приведену похибку його локалізації $\epsilon_{X.mid}$ (1) та її стандартне відхилення STD_{ϵ} (2)

3.6. Аналіз проблеми багатовитоковості на ділянці мережі

Оскільки наявність на ділянці водопровідної мережі відкритого чи прихованого витоку води є основною та превалюючою причиною аварійності, надалі в цій роботі аварійність ділянки ототожнюється з наявністю витоку води, а під багатоаварійністю маємо на увазі багатовитоковість, тобто одночасну наявність на ділянці протягом певного терміну часу двох і більше витоків. Для моделювання та аналізу розподілу ймовірностей виникнення витоків застосовано аналітичний метод, який базується на розподілі Пуассона, що є розподілом дискретної випадкової величини, яка дорівнює числу подій, що відбулися за певний фіксований час за умови, що такі події відбуваються з певною відомою середньою інтенсивністю та незалежно один від одного [51]. Згідно з розподілом Пуассона, ймовірність виникнення за деякий період часу T рівно k витоків визначається як

$$\bar{p}(k) = \frac{(\mu)^k}{k!} \exp(-\mu), \quad (3.50)$$

де μ – математичне сподівання кількості витоків за період T .

У роботі зроблено припущення, що послідовність витоків з водопровідної мережі задовольняє умовам стаціонарності, відсутності наслідків та ординарності. Під стаціонарністю розуміємо, що середня частота утворення нових витоків постійна та не залежить від пори року, дня тижня, години доби чи інших часових рамок. Відсутність наслідків означає, що ймовірність появи на контрольній ділянці нових витоків не залежить від передісторії цієї ділянки, тобто від кількості аварійних витоків за будь-який попередній часовий інтервал. Під ординарністю мається на увазі, що за достатньо малий проміжок часу практично неможливою є одночасна поява двох чи більше витоків. Строго кажучи, умова відсутності наслідків нехтує ефектом регресії аварійної ділянки, припускаючи, що за фіксований прогнозний термін у майбутньому середня частота аварійності буде такою ж, як і за наявний

попередній період спостережень. Принцип ординарності для витоків у напірних водопровідних мережах може порушуватися внаслідок короткочасних екстремальних перехідних процесів, під дію яких підпадає вся контрольна ділянка, наприклад, при виникненні в мережі гідравлічного удару.

3.6.1. Діапазони та тренди зміни питомої аварійності водопровідних мереж в Україні у 2007–2020 рр.

Статистичний аналіз розподілу питомої аварійності водопровідних мереж по областях України в 2020 р. вказує на наявність особливо великого розкиду значень, що істотно перевищує стандартне відхилення по вибірці в цілому (рис. 2). Середню питому аварійність водопровідних мереж визначали як середню зважену по довжині з врахуванням фактичної сумарної протяжності мереж по областях:

$$SE_{an.mid} = \frac{\sum SE_{an.i} L_i}{\sum L_i}, \quad (3.51)$$

де $SE_{an.i}$ – питома річна аварійність мереж в i -тій області, $\text{км}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$; L_i – загальна протяжність водопровідних мереж в i -тій області, км.

Середнє зважене по довжині значення питомої аварійності водопровідних мереж в Україні в 2020 р. при врахуванні всіх звітних даних складає $SE_{an.mid.1} = 5,87 \text{ км}^{-1} \text{рік}^{-1}$. Це в 1,95 рази перевищує просте середнє арифметичне показників по областях $3,01 \text{ км}^{-1} \text{рік}^{-1}$ та в 1,89 рази більше, ніж базове значення питомої аварійності $SE_{an.mid.0} = 3,1 \text{ км}^{-1} \text{рік}^{-1}$, прийняте у Водній Стратегії України на період до 2050 року за точку відліку, яку заплановано щороку зменшувати на 3% [2].

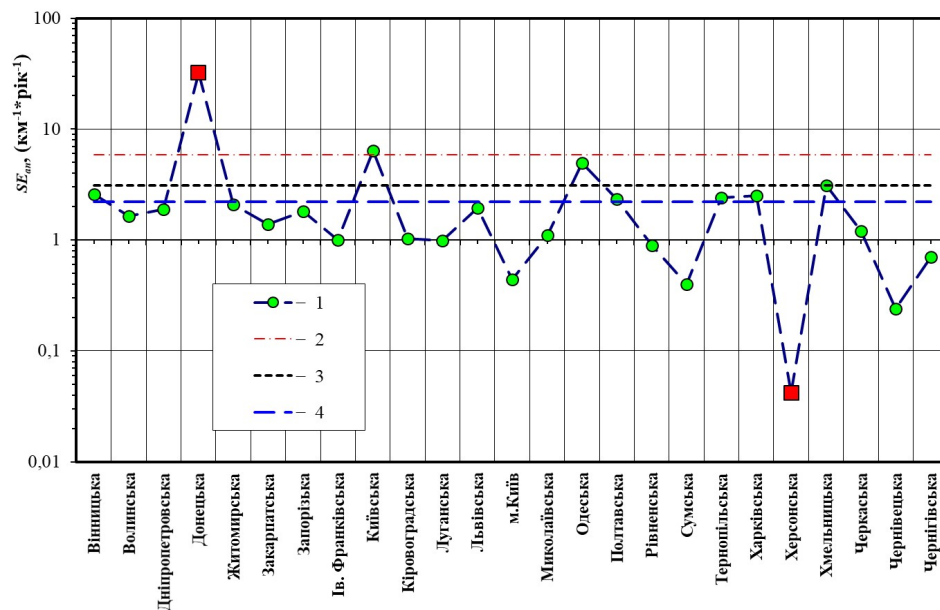


Рис. 3.21. Питома річна аварійність водопровідних мереж по областях України у 2020 р.: 1 – офіційні дані (Національна доповідь, 2021); 2 – середнє зважене $SE_{an.mid.1} = 5,87 \text{ км}^{-1}\text{рік}^{-1}$; 3 – $SE_{an.mid.0} = 3,1 \text{ км}^{-1}\text{рік}^{-1}$ (Водна Стратегія, 2022); 4 – середнє зважене $SE_{an.mid.2} = 2,12 \text{ км}^{-1}\text{рік}^{-1}$

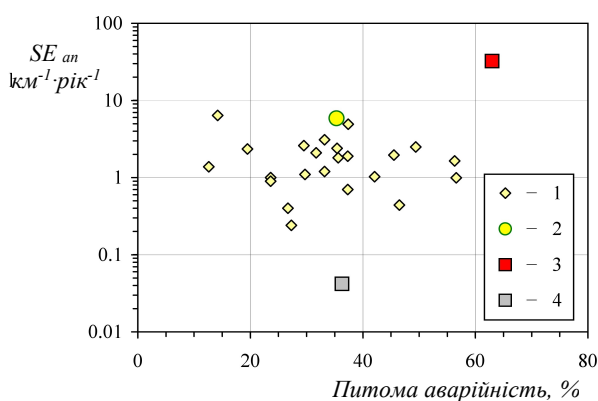
Відхилення від середніх значень окремих значень вибірки ніяк не можна обґрунтувати. За аналогічних техніко-економічних умов, що включають ступінь амортизації водопровідних мереж, вартість реалізації 1 м^3 води та ін., офіційно декларована питома аварійність у Донецькій обл. у 2020 р. $32,26 \text{ км}^{-1}\text{рік}^{-1}$ у 5,5 разів перевищувала середнє значення по країні, тоді як аналогічний показник для Херсонської обл. становив $0,042 \text{ км}^{-1}\text{рік}^{-1}$ або в 139,8 разів менше за середній показник. Відношення офіційної питомої аварійності в Донецькій та Херсонській обл. у 2020 р. становило 768 разів, що ставить під очевидний сумнів об'єктивність цих даних.

Виходячи з наведеного вище аналізу, крайні максимальне та мінімальне значення питомої аварійності водопровідних мереж у 2020 р. (відповідно $32,26 \text{ км}^{-1}\text{рік}^{-1}$ для Донецької обл. та $0,042 \text{ км}^{-1}\text{рік}^{-1}$ для Херсонської обл.) були видалені з наступної статистичної обробки як такі, що явно випадають з вибірки та є з високим ступенем ймовірності помилковими. Враховуючи велику протяжність мереж у Донецькій обл. (у 2020 р. – 15,38 тис.км або

12,6 % від загальної довжини водопровідних мереж в Україні), середнє значення питомої аварійності в уточненій скороченій вибірці зменшується до $SE_{an.mid.2} = 2,21 \text{ км}^{-1}\text{рік}^{-1}$ (рис. 3.20).

Статистичний аналіз вказує також на дуже низький ступінь кореляції між питомою аварійністю та часткою аварійних водопровідних мереж по областях у 2020 р. (рис. 3.21). Коефіцієнт кореляції становить 0,400, що значно нижче мінімального порогового значення 0,7, за якого вже можна робити висновок про наявність кореляції між вихідними параметрами.

а)



б)

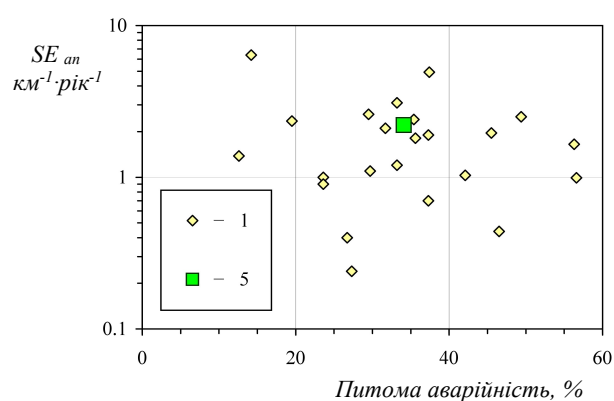


Рис. 3.22. Кореляція між питомою аварійністю водопровідних мереж по областях України у 2020 р. та відповідними частками аварійних мереж: а – всі фактичні дані; б – без аномальних значень; 1 – офіційні дані по областях (Національна доповідь, 2021); 2 – середній зважений показник ($R_E = 35,34\%$; $SE_{an.mid.1} = 5,87 \text{ км}^{-1}\text{рік}^{-1}$); 3, 4 – аномальні дані для Донецької та Херсонської обл. відповідно; 5 – середнє зважене без аномальних значень ($R_E = 34,1\%$; $SE_{an.mid.2} = 2,21 \text{ км}^{-1}\text{рік}^{-1}$)

3.6.2. Результати моделювання ймовірності багатоаварійності водопровідних мереж.

Виходячи з прийнятого вище принципу стаціонарності аварійних витоків на водопровідних мережах, математичне сподівання кількості витоків на ділянці мережі протяжністю L за довільний період часу T :

$$\mu_T = SE_{an} \cdot L \cdot T / 365, \quad (3.52)$$

де SE_{an} – річна питома аварійність ділянки, $\text{км}^{-1} \text{рік}^{-1}$; L – довжина ділянки водопровідної мережі, км ; T – період часу, дб .

У табл. 1 зведено річні ймовірності виникнення різної кількості аварій витоків на ділянці водопровідної мережі довжиною 1 км за різних типових значень питомої річної аварійності в діапазоні $SE_{an} = 0.1\text{--}5 \text{ км}^{-1} \text{рік}^{-1}$. Введемо позначення: p_p – ймовірність виникнення одного або більше аварійних витоків на ділянці водопровідної мережі; p_{2+} – ймовірність багатоаварійності (виникнення двох або більше аварійних витоків) на ділянці водопровідної мережі. Максимальні ймовірності при $SE_{an} \geq N_L \text{ км}^{-1} \text{рік}^{-1}$ відповідають річній кількості аварій-витоків N_L та (N_L-1) , зі зменшенням ймовірності в обидва боки (табл. 1). Річна ймовірність багатоаварійності p_{2+} різко зростає зі збільшенням показника SE_{an} , досягаючи за актуальної середньої станом на 2020 р. питомої річної аварійності водопровідних мереж в Україні $2,21 \text{ км}^{-1} \text{рік}^{-1}$ значення 0,648. Таким чином, на кожному випадково вибраному кілометрі напірних водопровідних мереж України з середньою ймовірністю 64,8% протягом календарного року має місце 2 або більше витоків. Максимально прийнятній з практичної точки зору ймовірності багатоаварійності 0,02 відповідає питома річна аварійність мереж $0,215 \text{ км}^{-1} \text{рік}^{-1}$, що відповідає мережам у практично досконалому технічному стані. Отримані результати вказують на необхідність підприємствами водопровідного господарства дотримуватися активної політики моніторингу мереж на наявність витоків, щоб запобігти великим втратам води та погіршенню стану мереж. Пасивна політика призводить як до збільшення втрат води та погіршення стану мереж, так і до різкого ускладнення задачі з виявлення нових прихованих витоків навіть для нових, попередньо безаварійних ділянок водопровідних мереж.

Представлена модель оцінки багатовитоковості на ділянці водопровідної мережі дозволяє оцінити ймовірність наявності на досліджуваній ділянці більше ніж одного витoku, що у більшості випадків унеможливорює

достовірне визначення місць витоків як за методом гідравлічного градієнта, так, у той самий час, і за більшістю методів, що використовують інші фізичні ефекти та принципи. Отримана залежність ймовірності багатовитоківості ділянки від питомої аварійності ділянки та її довжини дозволить покращити ефективність прийняття експлуатаційних рішень щодо проведення аварійних ремонтів водопровідної мережі.

Таблиця 3.6 Ймовірності різної кількості аварій-витоків на 1 км водопровідної мережі за рік

Кількість витоків N_L	Річні ймовірності за питомої аварійності SE_{an} , $\text{км}^{-1}\text{рік}^{-1}$:							
	5	4	3	2	1	0,5	0,2	0,1
0	0,0067	0,0183	0,0498	0,1353	0,3679	0,6065	0,8187	0,9048
1	0,0337	0,0733	0,1494	0,2707	0,3679	0,3033	0,1637	0,0905
2	0,0842	0,1465	0,224	0,2707	0,1839	0,0758	0,0164	0,0045
3	0,1404	0,1954	0,224	0,1804	0,0613	0,0126	0,0011	0,0002
4	0,1755	0,1954	0,168	0,0902	0,0153	0,0016	5E-05	4E-06
5	0,1755	0,1563	0,1008	0,0361	0,0031	0,0002	2E-06	8E-08
6	0,1462	0,1042	0,0504	0,012	0,0005	1E-05	7E-08	1E-09
7	0,1044	0,0595	0,0216	0,0034	7E-05	9E-07	2E-09	2E-11
8	0,0653	0,0298	0,0081	0,0009	9E-06	6E-08	5E-11	2E-13
9	0,0363	0,0132	0,0027	0,0002	1E-06	3E-09	1E-12	2E-15
10	0,0181	0,0053	0,0008	4E-05	1E-07	2E-10	2E-14	2E-17
10+	0,0137	0,00284	0,0003	8E-06	1E-08	8E-12	4E-16	0
p_p	0,9933	0,98168	0,9502	0,8647	0,6321	0,3935	0,1813	0,0952
p_{2+}	0,9596	0,9084	0,8009	0,5940	0,2642	0,0902	0,0175	0,0047

За умови виконання гіпотези стаціонарності кількість розрахункових витоків на ділянці є прямо пропорційною до періоду часу. Це підтверджує важливість швидкої локалізації витоків та їх ліквідації для зменшення ймовірності багатовитоківості на ділянці, що сама по собі вже ускладнює

задачу локалізації, а відтак і ремонту мережі. Враховуючи, що тривалість виявлення, локалізації та усунення витоків залежить від багатьох часткових параметрів, надалі використовується спеціальний параметр, – тривалість локалізаційно-ремонтного періоду (ЛРП) $T_{ЛРП}$, який означає термін в добах від появи на ділянці прихованого витoku до його усунення. Відтак, математичне сподівання кількості витоків на ділянці мережі довжиною L протягом ЛРП:

$$\mu_{LRP} = SE_{an} \cdot L \cdot T_{LRP} / 365, \quad (3.53)$$

Таким чином, ймовірність довільної кількості аварій, а отже і ймовірність багатоаварійності на довільній ділянці водопровідної мережі залежить від одного безрозмірного комплексу – середньої аварійності ділянки протягом ЛРП $\mu_{ЛРП}$:

$$\bar{p}(k) = \frac{\mu_{LRP}^k}{k!} \exp(-\mu_{LRP}), \quad (3.54)$$

Рівняння (5) має аналітичний розв’язок відносно ймовірності двох і більше одночасних (протягом ЛРП) аварій-витоків:

$$p_{2+} = 1 - (1 + \mu_{LRP}) \exp(-\mu_{LRP}), \quad (3.55)$$

Графічна інтерпретація рівняння (6), наведена на рис. 4, вказує на високу достовірність ($R^2 = 0,9998$) опису залежності ймовірності p_{2+} від математичного сподівання μ_{LRP} простою степеневою залежністю:

$$p_{2+} = 0,406 \mu_{LRP}^{1,968}, \quad (3.56)$$

У розгорнутому вигляді рівняння (5) записується у вигляді:

$$\bar{p}(k) = \frac{(SE_{an} \cdot L \cdot T_{LRP} / 365)^k}{k!} \exp(-SE_{an} \cdot L \cdot T_{LRP} / 365), \quad (3.57)$$

таким чином, за умов виконання гіпотез стаціонарності, відсутності наслідків та ординарності, ймовірність виникнення багатовитоковості на довільній ділянці водопровідної мережі є функцією питомої річної аварійності, довжини ділянки та тривалості ЛРП.

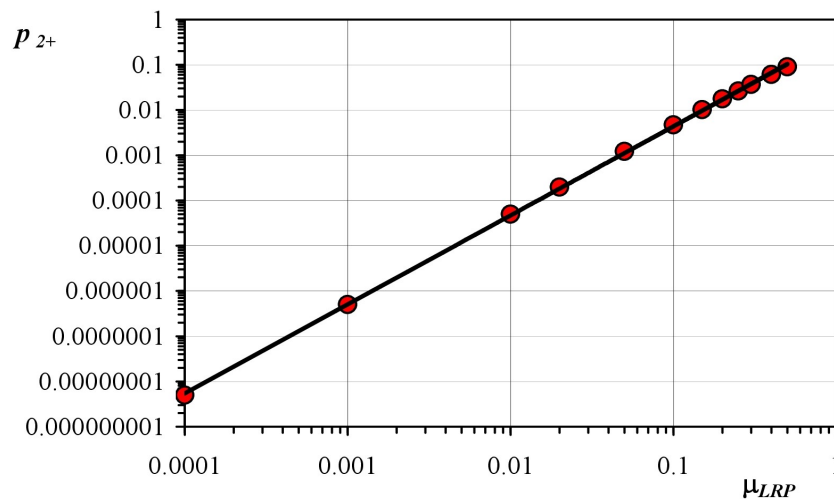


Рис. 3.23. Ймовірність багатоварійності p_{2+} протягом ЛРП залежно від математичного сподівання μ_{LRP}

Тривалість ЛРП є важливим експлуатаційним параметром, що безпосередньо впливає на ймовірність багатоварійності. У табл. 2 наведені ймовірності виникнення одного або більше витоків на ділянці напірної водопровідної мережі довжиною 1 км для типових значень тривалості локалізаційно-ремонтного періоду $T_{LRP} = 2\text{--}20$ діб за чотирьох характерних значень питомої річної аварійності SE_{an} , зокрема: на Львівському водопроводі ($1,41 \text{ км}^{-1}\text{рік}^{-1}$), у цілому в Україні станом на 2020 р. для всіх областей ($5,87 \text{ км}^{-1}\text{рік}^{-1}$) та без врахування аномальних даних ($2,21 \text{ км}^{-1}\text{рік}^{-1}$), а також для базового значення питомої річної аварійності згідно з Водною Стратегією України на період до 2050 року ($3,1 \text{ км}^{-1}\text{рік}^{-1}$). Ймовірність p_1 виникнення однієї аварії-витоку у вказаному діапазоні питомої річної аварійності є практично лінійними функціями тривалості T_{LRP} (рис. 5,а), тоді як ймовірність багатоварійності p_{2+} є пропорційною до тривалості ЛРП лише при $T_{LRP} < 5\text{--}6$ діб з наступним більш інтенсивним зростанням. Для середньої по Україні питомої річної аварійності $SE_{an} = 2,21 \text{ км}^{-1}\text{рік}^{-1}$ та за тривалості ЛРП 5 діб ймовірність багатоварійності p_{2+} становить лише 1,5 % від ймовірності виникнення одного витoku p_1 , тоді як при тривалості ЛРП 20 діб – вже 6,3 %. Для середньої по Львівському водопроводу питомої річної аварійності $SE_{an} = 1,41 \text{ км}^{-1}\text{рік}^{-1}$ відповідні частки пропорційно нижчі, а саме 1,0% при $T_{LRP} = 5$ діб та 4,0 % при $T_{LRP} = 20$ діб (рис. 5,б).

Таблиця 3.7. Ймовірності одночасного виникнення одного або більше витоків на ділянці напірної водопровідної мережі довжиною $L = 1$ км залежно від тривалості локалізаційно-ремонтного періоду T_{LRP} за характерних значень питомої річної аварійності SE_{an}

T_{LRP} , діб	Ймовірності p_1 та p_{2+} за значень SE_{an} , $\text{км}^{-1}\text{рік}^{-1}$							
	1,41		2,21		3,1		5,87	
	p_1	p_{2+}	p_1	p_{2+}	p_1	p_{2+}	p_1	p_{2+}
2	7,67E-03	2,97E-05	1,20E-02	7,27E-05	1,67E-02	1,43E-04	3,11E-02	5,06E-04
3	1,15E-02	6,66E-05	1,78E-02	1,63E-04	2,48E-02	3,19E-04	4,60E-02	1,13E-03
4	1,52E-02	1,18E-04	2,36E-02	2,89E-04	3,28E-02	5,64E-04	6,03E-02	1,98E-03
5	1,89E-02	1,84E-04	2,94E-02	4,49E-04	4,07E-02	8,77E-04	7,42E-02	3,06E-03
6	2,26E-02	2,64E-04	3,50E-02	6,44E-04	4,84E-02	1,26E-03	8,76E-02	4,37E-03
7	2,63E-02	3,59E-04	4,06E-02	8,73E-04	5,60E-02	1,70E-03	1,01E-01	5,88E-03
8	3,00E-02	4,68E-04	4,61E-02	1,14E-03	6,35E-02	2,21E-03	1,13E-01	7,60E-03
10	3,72E-02	7,27E-04	5,70E-02	1,76E-03	7,80E-02	3,41E-03	1,37E-01	1,16E-02
12	4,43E-02	1,04E-03	6,76E-02	2,52E-03	9,20E-02	4,85E-03	1,59E-01	1,64E-02
15	5,47E-02	1,62E-03	8,29E-02	3,88E-03	1,12E-01	7,46E-03	1,90E-01	2,48E-02
20	7,15E-02	2,84E-03	1,07E-01	6,77E-03	1,43E-01	1,29E-02	2,33E-01	4,19E-02

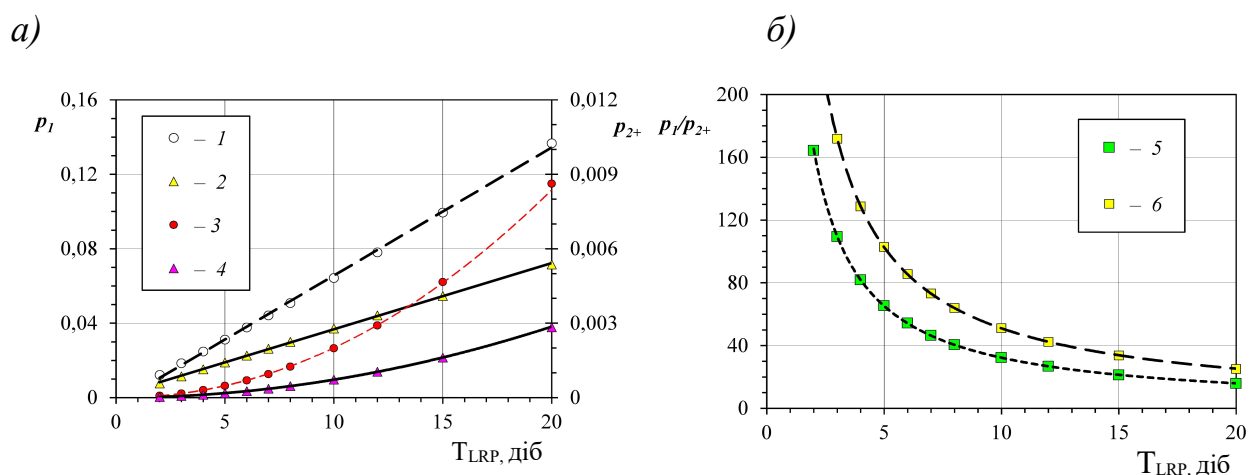


Рис. 3.24. Ймовірнісні показники багатовитоковості на 1 км водопровідних мереж залежно від тривалості ЛРП:

а – ймовірності витоків p_1 (1, 2) та p_{2+} (3, 4); б – співвідношення p_1/p_{2+} ; для $SE_{an}=2.21 \text{ км}^{-1}\text{рік}^{-1}$ (1, 3, 5); для $SE_{an}=1.41 \text{ км}^{-1}\text{рік}^{-1}$ (2, 4, 6)

Потрібно зазначити, що питома річна аварійність ділянки, як і її довжина, є достатньо визначеними параметрами, тоді як тривалість ЛРП для однієї і тієї ж ділянки, за наявності однієї і тієї ж системи виявлення витоків може суттєво відрізнятись. Вона залежить значною мірою від типу витoku, що є складною функцією віку, матеріалу, товщини стінок труб, гідрогеологічних умов тощо. Таким чином, ймовірність багатоаварійності будь-якої ділянки водопровідної мережі потрібно виражати як функцію річної аварійності цієї ділянки E_{an} та періоду T_{LRP} :

$$p_{2+} = 1 - (1 + E_{an} \cdot T_{LRP}) \exp(-E_{an} \cdot T_{LRP}) \quad (3.58)$$

У загальному, залежно від питомої аварійності та довжини ділянки річна аварійність ділянок водопровідних мереж змінюється в широких межах $E_{an} = 0,1\text{--}10 \text{ рік}^{-1}$. Результати моделювання залежності ймовірності багатоаварійності для типових значень річної аварійності E_{an} у межах від $0,1 \text{ рік}^{-1}$ до 10 рік^{-1} представлені на рис. 3.24.

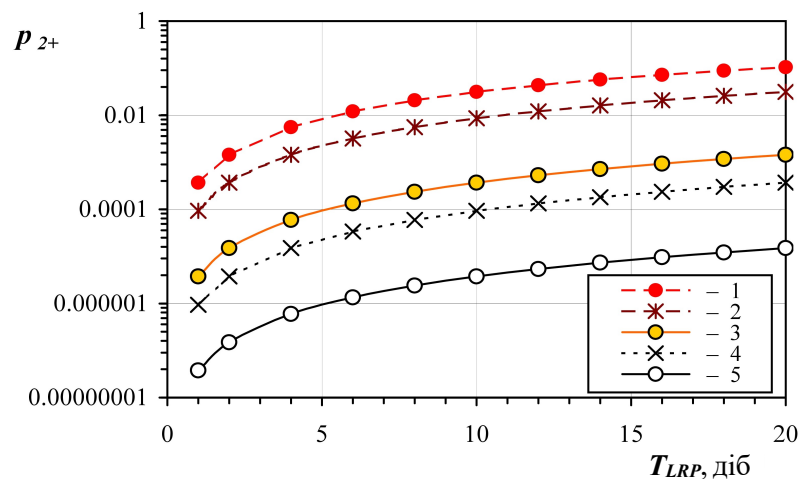


Рис. 3.25. Ймовірність багатоаварійності ділянок водопровідних мереж залежно від тривалості ЛРП для різних значень річної аварійності E_{an} : 1 – $0,1 \text{ рік}^{-1}$; 2 – $0,5 \text{ рік}^{-1}$; 3 – 1 рік^{-1} ; 4 – 2 рік^{-1} ; 5 – 5 рік^{-1} ; 6 – 10 рік^{-1}

Максимально допустима (гранична) тривалість ЛРП істотно зменшується як за збільшення річної аварійності ділянки водопровідної мережі, так і за

зменшення ймовірності багатоаварійності p_{2+} (рис. 7). Наприклад, для забезпеченості відсутності багатоаварійності 99%, що відповідає ймовірності $p_{2+} = 0,01$, та значенню річної аварійності ділянки $E_{an} \geq 5.87 \text{ рік}^{-1}$ тривалість виявлення і локалізації витoku та ремонту ділянки має бути не більшою за 9 діб.

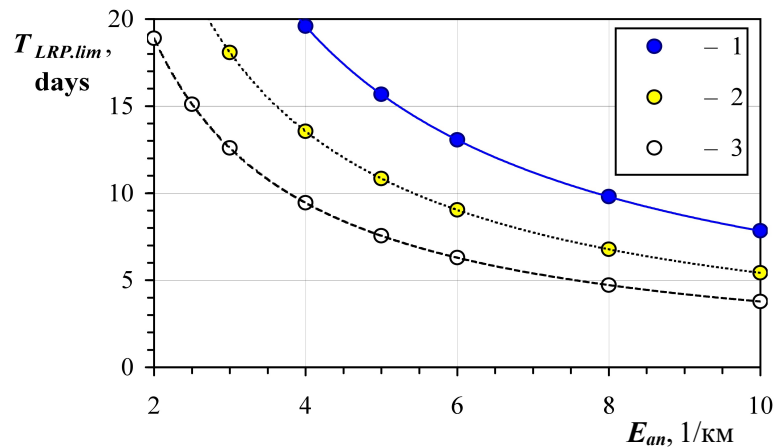


Рис. 3.26. Гранично допустимі тривалості ЛРП як функція річної аварійності ділянки для ймовірностей багатоаварійності p_{2+} : 1 – 0,02; 2 – 0,01; 3 – 0,005

Степеневі лінії тренду для результатів, отриманих для характерних ймовірностей p_{2+} 0,005; 0,01 та 0,02, наведені на рис. 7, вказують на те, що граничний час ЛРП обернено пропорційний до річної аварійності ділянки E_{an} :

$$T_{LRP.lim} = K / E_{an}, \quad (3.59)$$

де коефіцієнт K залежить від ймовірності багатоаварійності p_{2+} (рис. 8):

$$K = 600p_{2+}^{0.52} \quad (3.60)$$

Таким чином, гранична тривалість ЛРП, що відповідає практично важливим значенням ймовірності багатоаварійності $p_{2+} = 0,1-3,0 \%$ для ділянок з типовою річною аварійністю $E_{an} = 1-10 \text{ рік}^{-1}$ може бути визначена за напівемпіричною степеневою залежністю:

$$T_{LRP.lim} = 600p_{2+}^{0.52} / E_{an} \quad (3.61)$$

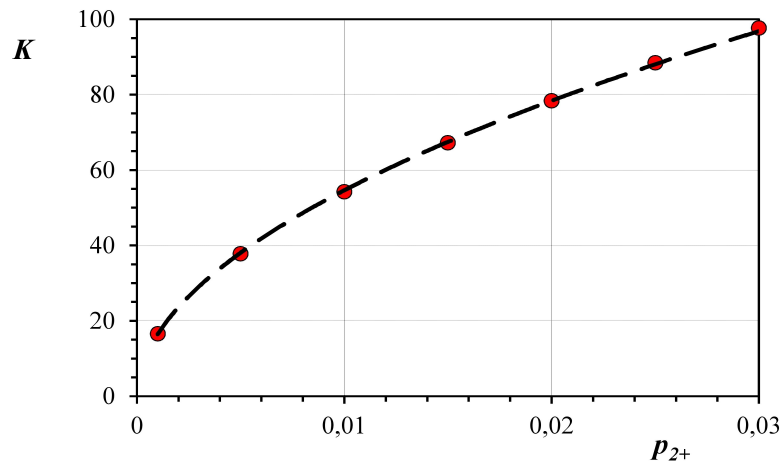


Рис. 3.27. Залежність коефіцієнта K у рівнянні (10) від ймовірності багатоаварійності p_{2+}

Потрібно зазначити, що представлена вище модель багатоаварійності водопровідних мереж розроблена на основі закону розподілу незалежних подій Пуассона за умови виконання трьох часткових гіпотез: стаціонарності, відсутності наслідків та ординарності. Вказані гіпотези можуть бути перевірені та достовірно кількісно оцінені лише за наявності довготривалих натурних спостережень за окремими ділянками водопровідної мережі.

Втрати води на витоки води з водопровідних мереж є одним з основних факторів, що напряму впливають на техніко-економічну ефективність систем водопостачання в цілому. За наявними результатами повномасштабних натурних досліджень у різних країнах світу приховані витоки води з водопровідних мереж складають від 50% до 90% від загальних втрат води на витоки. Наявність на ділянці водопровідної мережі двох та більше одночасних витоків суттєво знижує точність локалізації прихованих витоків, що робить актуальною задачу оцінки ймовірностей багатоаварійності ділянок залежно від їх попередніх статистичних параметрів аварійності.

За даними офіційних звітів виконано аналіз стану водопровідних мереж в Україні та у Львові, встановлено, що станом на кінець 2020 року питомі річні аварійності мереж становили $2,21 \text{ км}^{-1}\text{рік}^{-1}$ для України в цілому та

$1,41 \text{ км}^{-1}\text{рік}^{-1}$ для Львівського водопроводу. Разом з тим, дуже низька кореляція між часткою аварійних мереж та питомою річною аварійністю по областях України вказує на суб'єктивність окремих звітних даних. Виходячи з цього факту та з варіативності питомої аварійності на кожній конкретній водопровідній мережі залежно від віку та матеріалу труб, рекомендується при оцінюванні ймовірностей виходити не з осереднених значень, а зі статистичних параметрів для відповідної ділянки водопровідної мережі.

Для імовірнісного опису проблеми багатоаварійності водопровідних мереж застосовано метод незалежних подій Пуассона за умови виконання гіпотез стаціонарності, відсутності наслідків та ординарності аварійних витоків. Отримано аналітичну залежність (6) ймовірності багатоаварійності від питомої річної аварійності ділянки, її довжини та тривалості ЛРП. Проаналізовано чисельні значення ймовірності багатоаварійності, виходячи з середньої по Україні та середньої у Львові питомої річної аварійності водопровідних мереж. Отримано узагальнену напівемпіричну залежність (3.61) для визначення гранично допустимої тривалості ЛРП від річної аварійності ділянки та заданої ймовірності багатоаварійності.

3.7. Висновки

1. У розділі 3 комплексно досліджено та проаналізовано теоретичні та технічні аспекти виявлення прихованих витоків у водопровідних мережах з використанням методу гідравлічного градієнта та статистично-гідравлічного методу, а також імовірнісну оцінку багатоаварійності.

2. Проаналізовані приведені похибки локалізації прихованих витоків з використанням методу гідравлічного градієнта. Метод підтвердив свою відносну ефективність як простий і доступний інструментальний спосіб локалізації витоків, особливо на завершальному етапі, після наближеної локалізації проблемної ділянки за допомогою дистанційного моніторингу. Основним обмеженням методу є необхідність вимірювання тиску в проміжній точці, для чого потрібно проводити додаткові допоміжні розкопування по довжині ділянки.

3. Введено до розгляду та проаналізовано оптимізаційну функцію F_{opt} , як відношення приведеної похибки локалізації витoku за методом гідравлічного градієнта до ймовірності його виявлення після першого допоміжного розкриття по трасі трубопроводу. 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).

4. 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 $\pm 1\%$ відносно еталонної, але неявної формули Колбрука-Вайта. Це робить формулу Холанда найефективнішою для практичного застосування в алгоритмах локалізації витоків за статистично-гідравлічним методом.

5. У загальному випадку координата точки витoku X є функцією 11 розмірних вхідних параметрів: $X = F(z_1; z_2; p_1; p_2; \gamma; L; D; \Delta e; Q_1; Q_2; v)$. Застосовуючи π -теорему Бекінгема відносно координату X/L можна представити як функцію восьми безрозмірних комплексів: $X/L = F(I; \Delta e/D; \Delta Q/Q; Re_1; Re_2; Eu; \omega_o/\omega_{тр})$.

6. На чисельній імітаційній моделі виконано теоретичні дослідження з визначення систематичних приведених похибок статистично-гідравлічного методу залежно від п'яти основних вхідних параметрів: безрозмірної витрати витoku, діаметра трубопроводу, площі отвору, надлишкового тиску на ділянці та відносної координати витoku. Отримані лінії тренду можуть бути рекомендовані для коригувального уточнення очікуваної координати точки витoku.

7. За кожним із п'яти вищевказаних вхідних параметрів отримано залежності стандартного відхилення значень приведених похибок локалізації. Отримані лінії тренду можуть бути рекомендовані для оцінки діапазону відхилення координати фактичного місця витoku відносно очікуваної координати залежно від значень вхідних параметрів.

8. Для статистичної оцінки проблеми багатоаварійності на ділянці застосовано модель незалежних подій Пуассона. За умови виконання гіпотез стаціонарності, відсутності наслідків та ординарності аварійних витоків отримано аналітичні залежності для оцінки ймовірності багатоаварійності залежно від питомої річної аварійності, довжини ділянки та тривалості локалізаційно-ремонтного процесу. Виконано оцінку ймовірностей багатоаварійності ділянок водопровідних мереж для типових в Україні та Львові значень питомої аварійності.

9. Проаналізовано гранично допустимі строки виявлення, локалізації та усунення витоків для мінімізації ризику виникнення повторних або множинних аварій на одній ділянці. Підкреслено важливість застосування локальної статистики, а не усереднених значень, оскільки аварійність суттєво залежить від матеріалу труб, їхнього віку та технічного стану.

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ПРИХОВАНИХ ВИТОКІВ

4.1. Натурна верифікація статистично-гідравлічного методу

Верифікацію статистично-гідравлічного методу локалізації прихованих витоків води з напірних водопровідних мереж виконано на прикладі водопроводу м. Кам'янець-Подільський (Хмельницька обл.). Для забезпечення водою мешканців міста Кам'янець-Подільський з кількістю мешканців близько 100 тис осіб, щоденно відбувається забір води з річки Дністер, середнім обсягом ≈ 15 тис. $\text{м}^3/\text{добу}$. Водопровідна насосна станція першого підйому (ВНС-I) здійснює забір води на глибині 32 м, після чого вода подається на станцію очистки та знезараження води (СОЗВ), яка знаходиться на території ВНС-2, насосними агрегатами марки ЦН-1000-180-3, з тиском 1,55 МПа по двох сталевих трубопроводах Д720мм довжиною 8,06 км (додаток Д.). Магістральний водогін перебуває у незадовільному технічному стані та характеризується високим рівнем аварійності.

На СОЗВ відбувається чищення та знезараження води, що включає механічну очистку, коагуляцію, флокуляцію, осадження, фільтрацію, та знезараження гіпохлоритом натрію, після чого подається в 3 резервуари чистої води (РЧВ) об'ємом 6 тис. м^3 кожний. З РЧВ вода перекачується насосами ЦН-8-НДВ, Д 1000-55, НД40/72,5 водопровідної насосної станції другого підйому (ВНС-II) по сталевому трубопроводу діаметром 630x8 мм, довжиною 15,02 км, робочий тиск 0,3МПа, на водопровідну насосну станцію третього підйому (ВНС-III), звідки подається через розподільну мережу м. Кам'янець-Подільський до споживачів.

Магістральний водогін перебуває у незадовільному технічному стані та характеризується високим рівнем аварійності.

Випадок 1. 19 серпня 2022 року на водогоні між ВНС-2 та ВНС -3 стався масштабний витік води. Детальний опис аварії наведено в Додатку Д. О 17:00 завдяки даним з технологічних лічильників диспетчером аварійної служб КП «Міськтепловоденергія» було помічено різницю в показках лічильників ВНС-2 та ВНС-3 об'ємною витратою близько 34 м³/год, що відповідає 14,4% від подачі ВНС-2.

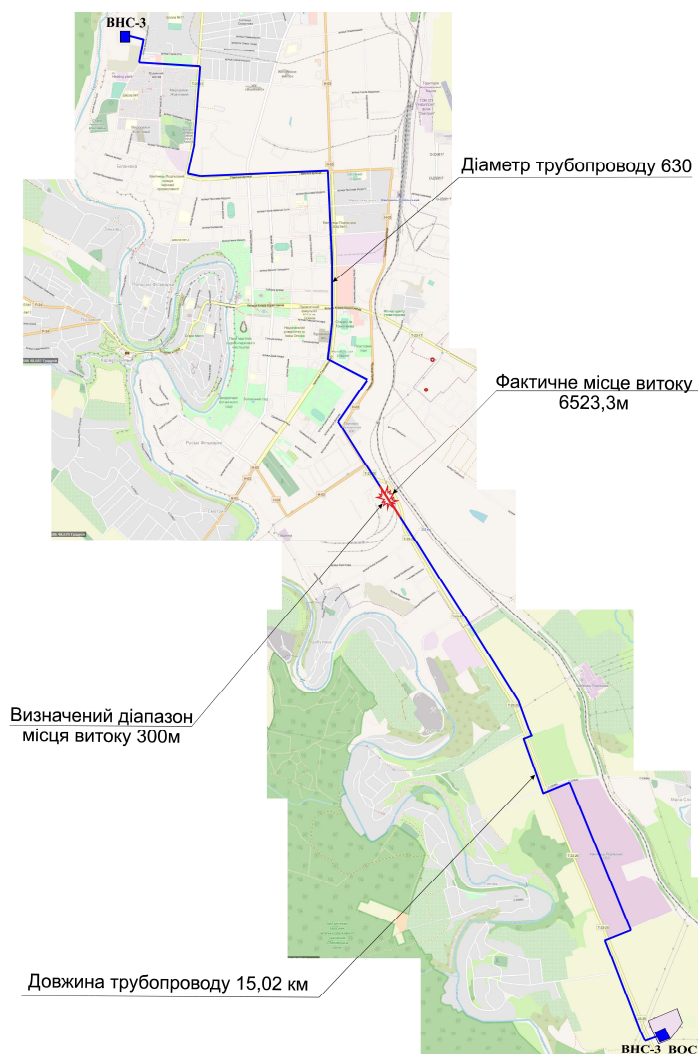


Рис. 4.1 Схема ділянки напірного водоводу від ВНС-2 до ВНС-3 у м. Кам'янець Подільський, Ø630мм, з вказанням діапазону дистанційної локалізації місця витіку та його фактичного розташування.

Аварію було ліквідовано 22.08.2022 17:00:00, головним чином завдяки виявленому збільшеному притоку стічних вод на каналізаційну насосну станцію номер (КНС №3), завдяки чому час ліквідації витіку склав 3 доби

або 72 год. Тобто вода, що витікала з трубопроводу, потрапляла в каналізаційний колектор. Важливо зазначити, що можливість діагностики притоку на КНС доступна лише за умови бездощової погоди, оскільки каналізаційна мережа – загальносплавна. У результаті проведених заходів місце витоку було локалізовано на відстані 6523 м від початку відліку траси магістрального водогону (пікетаж: км 6+523).

На основі вихідних даних з врахуванням класів точності вимірювального обладнання (манометрів та витратомірів) виконано процедуру локалізації прихованого витоку. Інтегральні результати при зміні кількості точок від 1 до 10 тис. представлені на рис. 4.2. Очікуване середнє значення координати витоку отримане рівним 6504 м, що на 19,3 м або на 0,30% менше за координату фактичного виявленого витоку (6523,3 м). На рис. 4.2 показано також стандартне відхилення значень X , визначених за 1000-точковими пакетами $STD=130,4$ м або 0,87% від довжини ділянки.

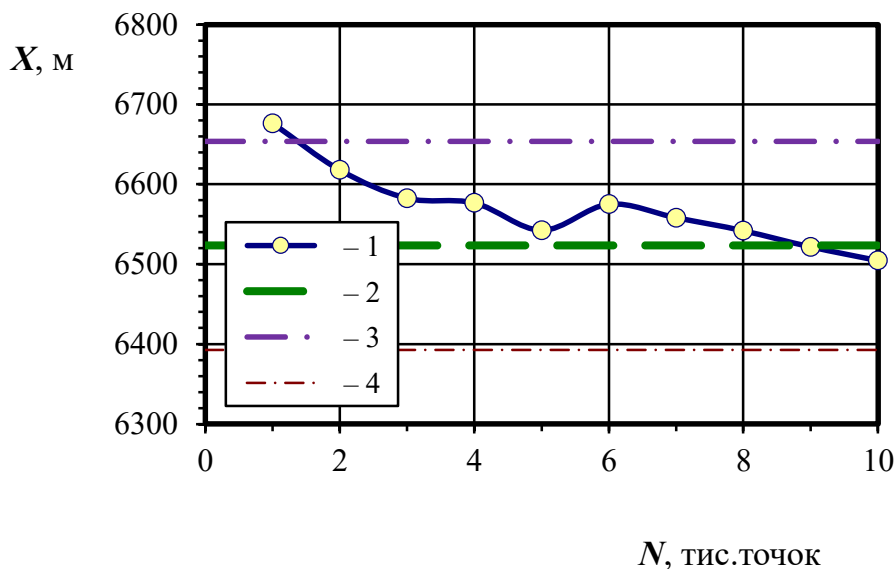


Рис. 4.2 Похибки локалізації місця розташування витоку води між ВНС-1 та ВНС-2, на ділянці напірного водогону $\varnothing$ 630мм X , м: 1 – за СГМ; 2 – фактичне місце витоку, 6523,3 м; 3, 4 – верхня та нижня межа відповідно за $STD=130,4$ м

Випадок 2. На магістральному водогоні між ВНС-1 до ВНС- 2, на одному з 2х паралельних ниток водогонів Ø720мм., було виявлено різницю в показах технологічних лічильників об'ємом близько 144м³/год. Методом натурного обходу не було виявлено жодного витoku води. Після довгих пошуків, на ділянці водопроводу 8040м., витік було виявлено на частині ділянки водогону, під руслом річки.

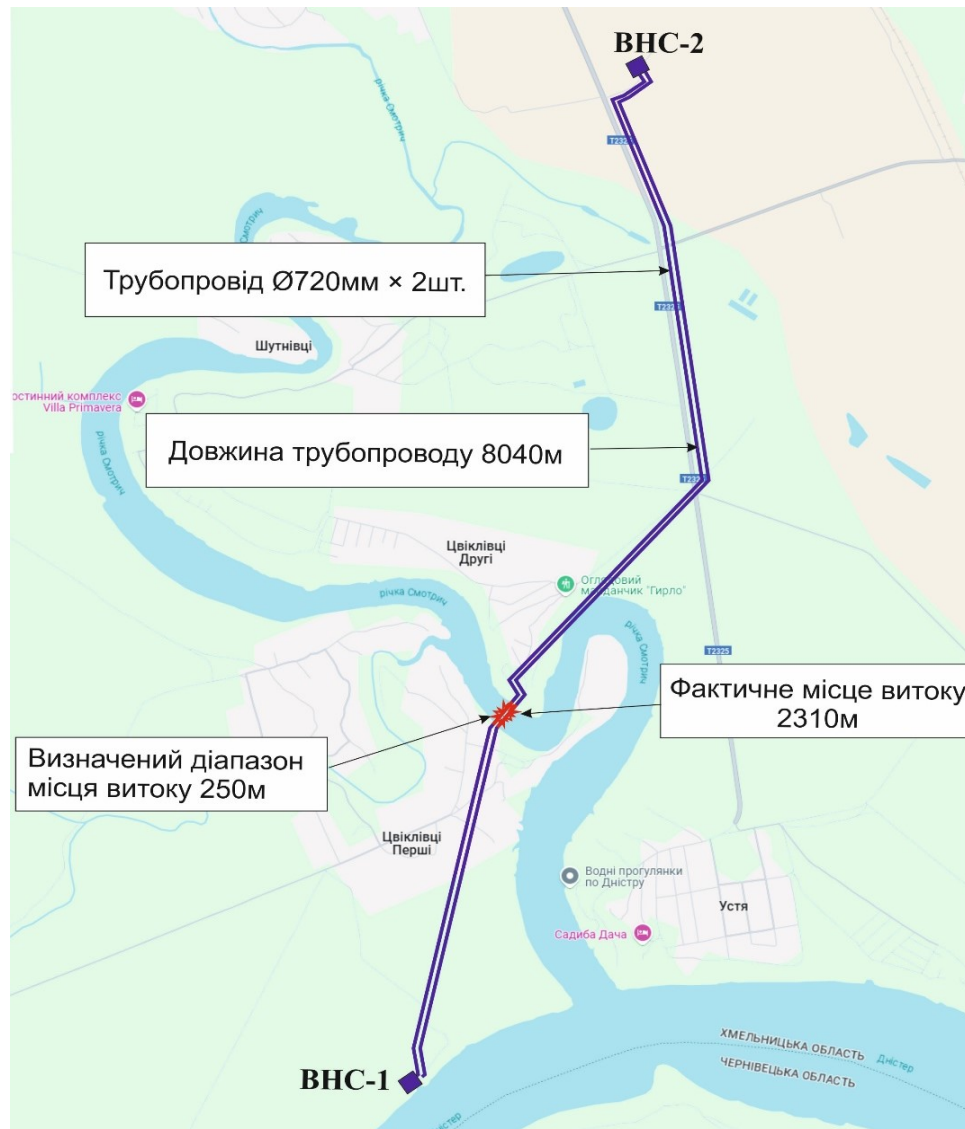


Рис. 4.3 Схема ділянки напірного водоводу від ВНС-1 до ВНС-2 у м. Кам'янець Подільський, Ø720мм, з вказанням діапазону дистанційної локалізації місця витoku та його фактичного розташування.

На основі вихідних даних з врахуванням класів точності вимірювального обладнання (манометрів та витратомірів) виконано процедуру локалізації прихованого витоку. Інтегральні результати при зміні кількості точок від 1 до 10 тис. представлені на рис. 4.4. Очікуване середнє значення координати витоку отримане рівним 2250 м, що на 60 м менше за координату фактичного виявленого витоку (2310м). На рис. 4.2 показано також стандартне відхилення значень X , визначених за 1000-точковими пакетами $STD=240$ м від довжини ділянки.

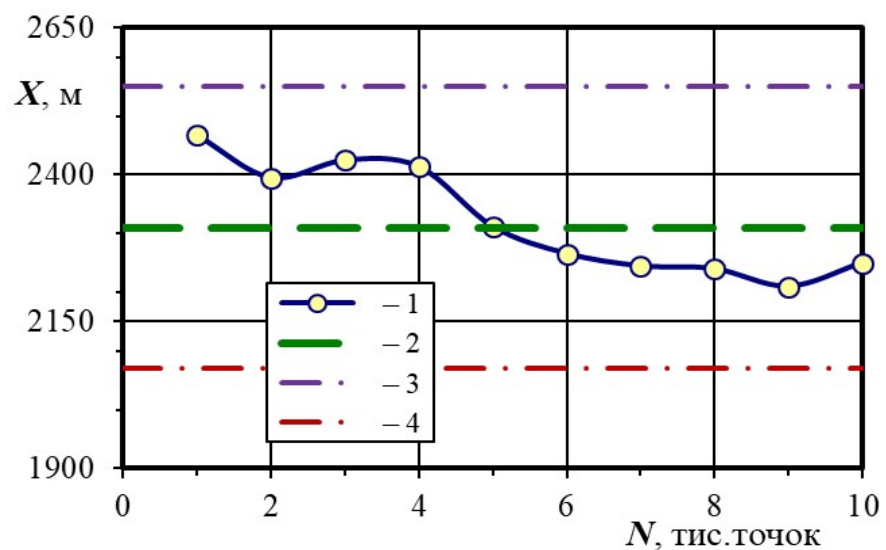


Рис 4.4 Похибки локалізації місця розташування витоку води між ВНС-1 та ВНС-2, на ділянці напірного водогону Ø720мм X , м: 1 – за СГМ; 2 – фактичне місце витоку; 3, 4 – верхня та нижня межа відповідно за STD

Випадок 3. На аварійному водогоні між ВНС-2 та ВНС -3 м 23.01.2025 стався інший випадок витоку води, об'ємом втрат меншим ніж у Випадку 1, приблизно 44 м³/год. Витік стався на «коліні» (повороті трубопроводу 90°) трубопроводу Ø 630мм, його було ліквідовано за 54 год.

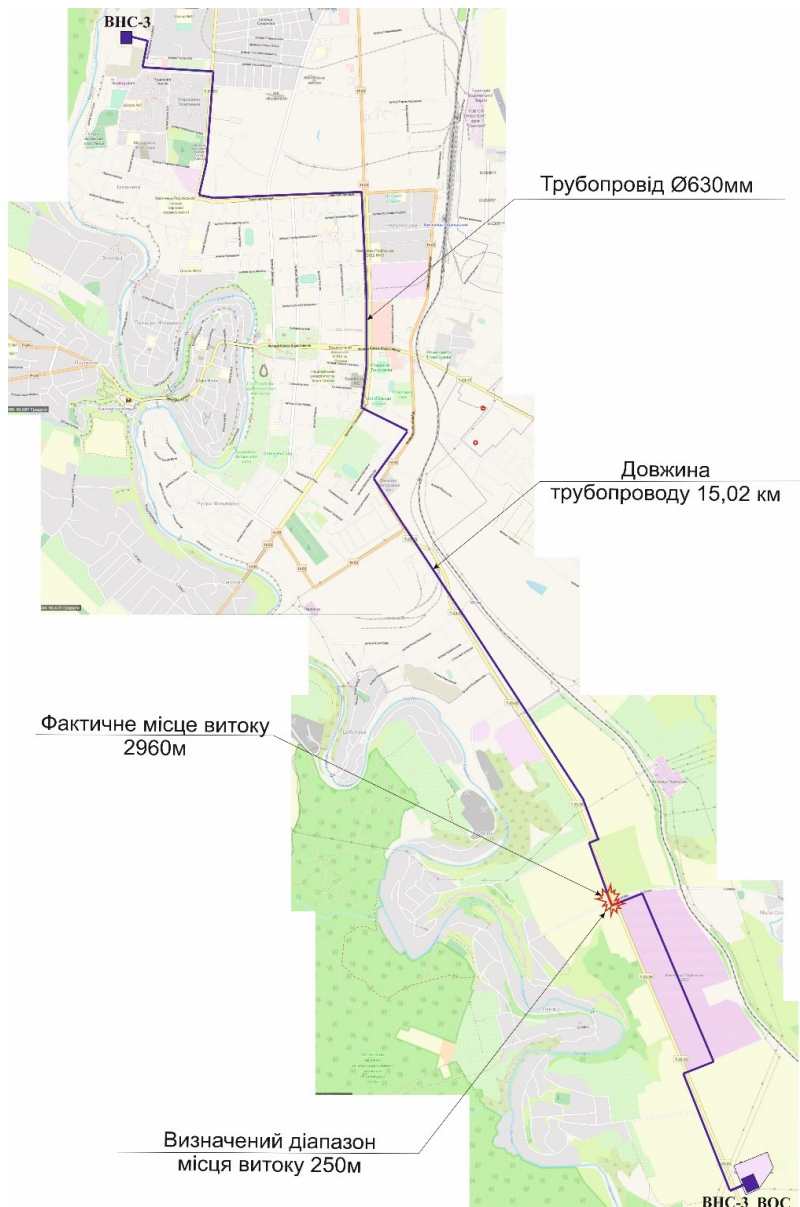


Рис. 4.5 Схема ділянки напірного водоводу від ВНС-2 до ВНС-3 у м. Кам'янець Подільський, Ø630мм, з вказанням діапазону дистанційної локалізації місця витoku та його фактичного розташування.

На основі вихідних даних з врахуванням класів точності вимірювального обладнання (манометрів та витратомірів) виконано процедуру локалізації прихованого витoku. Інтегральні результати при зміні кількості точок від 1 до 10 тис. представлені на рис. 4.6. Очікуване середнє значення координати витoku отримане рівним 3066,4 м, що на 106,4 м менше за координату фактичного виявленого витoku (2960 м). На рис. 4.2 показано

також стандартне відхилення значень X , визначених за 1000-точковими пакетами $STD=237,73$ м від довжини ділянки.

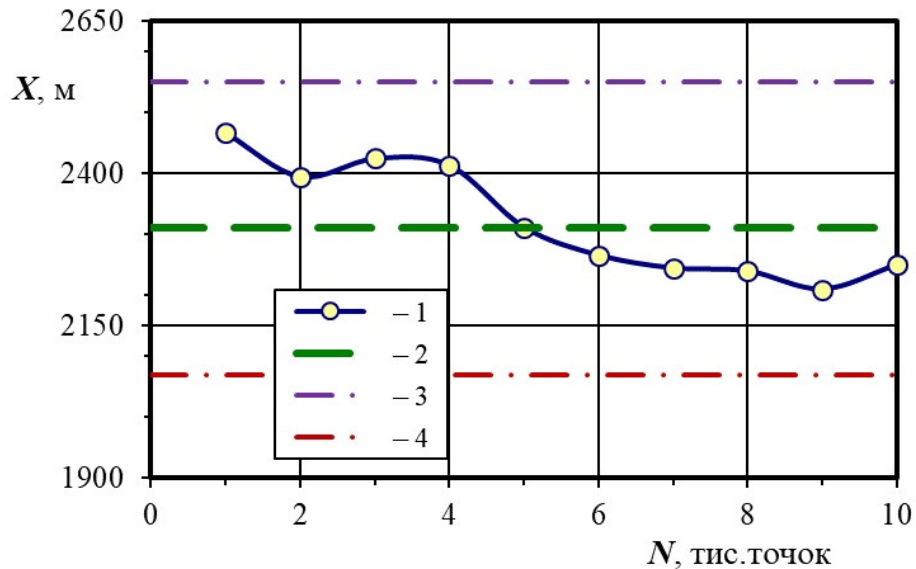


Рис 4.6. Похибки локалізації місця розташування витoku води між ВНС-1 та ВНС-2, на ділянці напірного водогону $\varnothing$ 630мм. X , м: 1 – за СГМ; 2 – фактичне місце витoku; 3, 4 – верхня та нижня межа відповідно за STD

Випадок 4. На магістральному водогоні Зарудці–Збойща Львівського водопроводу (рис. 4.7), у квітні 2025 р. зафіксовано витік води об'ємом близько $100 \text{ м}^3/\text{год}$. Так як в магістральний водопровід існує багато врізок на супутні села, для визначення місця пошкодження було застосовано накладний прилад для виміру об'єму потоку рідини Panametrics. Попередньо було встановлено ділянку водогону довжиною 1720 м, на якій відбувається витік. За допомогою СГМ витік локалізовано в точці з координатою 1442 ± 209 м, а фактичний витік води виявлено у перерізі з координатою 1530м від початку ділянки. У цьому випадку приведена похибка локалізації витoku склала 5,1%. Відносно більше значення приведеної похибки пояснюється використанням портативного накладного витратоміра з дещо більшою похибкою вимірювання об'ємної витрати, а саме 3–5%.



Рис.4.7 Схема ділянки напірного водоводу від ВНС «Зарудці» до ВНС «Збоїща» у м. Львів, Ø820мм, з вказанням діапазону дистанційної локалізації місця витоку та його фактичного розташування.

Застосування статистично-гідравлічного методу локалізації прихованих витоків дозволяє значно скоротити час між моментом виникнення витоку та його виявленням і ліквідацією. Насамперед, виявлення аномалії у витратах води за допомогою технологічних лічильників може бути здійснене протягом 1–2 годин з моменту виникнення витоку. Швидкість цього процесу значною мірою залежить від доступності та оперативності обробки вхідних даних через SCADA-систему або інші системи диспетчерського моніторингу.

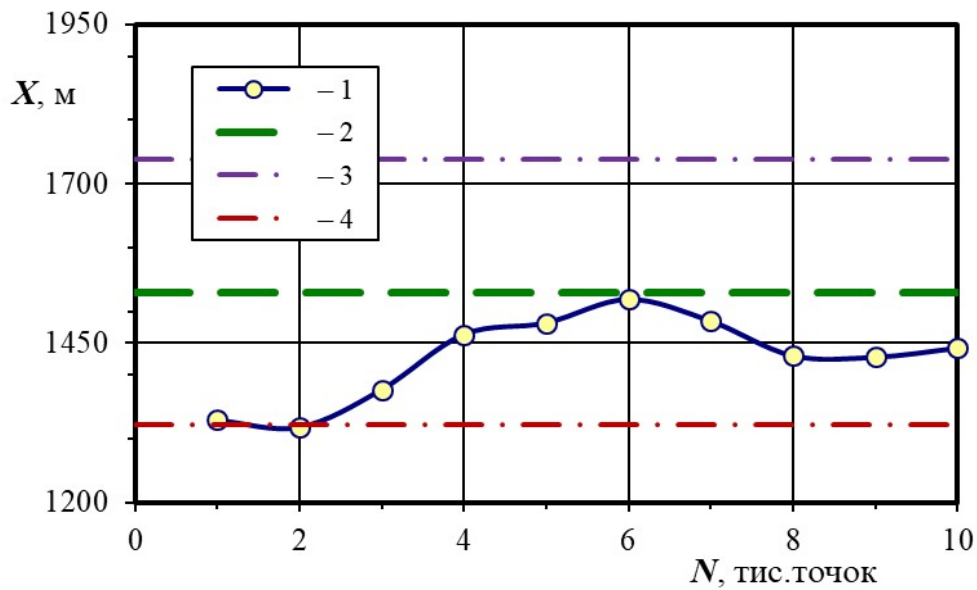


Рис.4.8 Похибки локалізації місця розташування витоку води між ВНС «Зарудці» та ВНС «Збоїща», на ділянці напірного водогону Ø 820мм X, м: 1 – за СГМ; 2 – фактичне місце витоку; 3, 4 – верхня та нижня межа відповідно за STD

Після виявлення аномалії проводиться гідравлічний розрахунок, за результатами якого ділянку пошуку можна звужити до 2,0% довжини водогону, що в конкретному випадку відповідає відстані до 0,3 км. Такий аналіз зазвичай виконується протягом приблизно однієї години. Далі ефективність ліквідації залежить від організованості аварійної служби та її оперативного реагування після отримання попередніх координат потенційного витоку. Завдяки поєднанню оперативного виявлення, швидкого аналізу даних і точного визначення ділянки пошуку стає можливим локалізувати витік у межах 8–16 годин від моменту його виникнення.

4.2. Економічний ефект від впровадження статистично-гідравлічного методу локалізації витоків

Вхідними параметрами для визначення економічного ефекту від впровадження статистично-гідравлічного методу локалізації прихованих витоків, є величина прихованого витоку Q_v , ($\text{м}^3/\text{год}$), середня тривалість локалізації та ліквідації витоку за допомогою традиційного методу натурного обстеження мережі, що позначається як t_{p1} (год), середня тривалість локалізації та ліквідації витоку за допомогою статистично-гідравлічного методу, яка позначається як t_{p2} (год).

Економія водних ресурсів:

$$\Delta W = Q_v(t_1 - t_2), \text{ м}^3 \quad (4.1)$$

де ΔW – зменшення об'єму втрат води на витік, м^3 ;

Q_v – інтенсивність витоку, $\text{м}^3/\text{год}$;

t_{p1} – тривалість ліквідації витоку традиційним методом, год;

t_{p2} – тривалість ліквідації витоку з використанням статистично-гідравлічного методу, год.

У розширеному вигляді:

$$Q_v = \mu_o \cdot \omega_o \sqrt{\frac{2p}{\rho}}, \text{ м}^3 \quad (4.2)$$

μ_o – коефіцієнт витрати отвору витоку;

ω_o – площа отвору або щілини витоку, м^2 ;

p – надлишковий тиск у місці витоку, Па;

ρ – питома маса води, $\text{кг}/\text{м}^3$.

$$\Delta W = \mu_o \cdot \omega_o \sqrt{\frac{2g}{\rho}}(t_{p1} - t_{p2}), \text{ м}^3 \quad (4.3)$$

Економія електроенергії на підйом та транспортування води

$$E_{\text{sum}} = f(Q_{n0}; H_{n0}; \eta_n),$$

де $E_{\text{пит}}$ – питоме споживання електроенергії, кВт·год;

$Q_{\text{н0}}$ – об’ємна подача води без витоку, м³/год;

$H_{\text{н0}}$ – напір насосів ВНС без витоку, м;

$\eta_{\text{н}}$ – коефіцієнт корисної дії насосів.

За відсутності витоку на ділянці:

– корисна потужність насосних агрегатів:

$$N_{\text{з0}} = \rho g Q_{\text{н0}} H_{\text{н0}} \quad (4.4)$$

– споживана потужність:

$$N_{\text{сп0}} = \rho g \cdot Q_{\text{н0}} \cdot H_{\text{н0}} / \eta_{\text{н}} \quad (4.5)$$

де $N_{\text{сп.0}}$ – споживана потужність при наявності витоку, Вт.

За наявності витоку з витратою $Q_{\text{в}}$ для насосів з частотними регуляторами (рис. 4.9):

$$H_{\text{н0}} = H_{\text{н}}; \quad Q_{\text{н}} = Q_{\text{н0}} + Q_{\text{в}}; \quad (4.6)$$

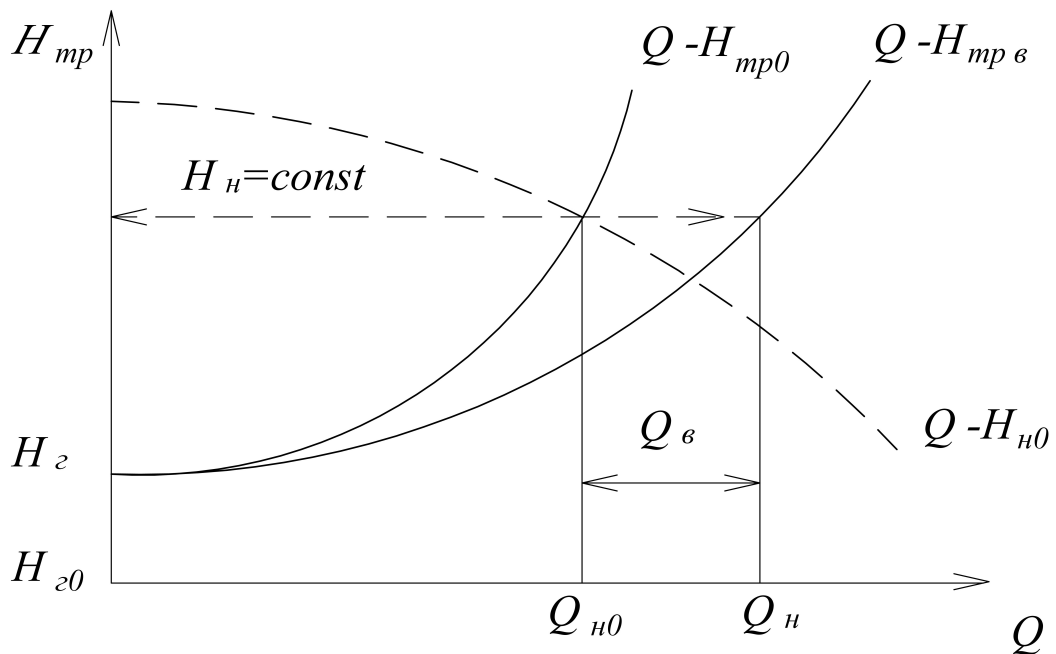


Рис. 4.9. Зміщення робочої точки у випадку виникнення витоку на напірному трубопроводі, за наявності частотного регулятора.

Величина відносного витоку:

$$Q'_e = Q_e / Q_{n0} \quad (4.7)$$

Співвідношення подач НС:

$$\frac{Q_n}{Q_{n0}} = 1 + Q'_e \quad (4.8)$$

За умови $Q'_e \leq 0,05$ $\eta_{n0} \approx \eta_n$, звідки потужність, споживана насосними станціями за наявності витоку:

$$N_{cn.e} = \frac{\rho g \cdot Q_n \cdot H_n}{\eta_n} = \frac{\rho g \cdot Q_{n0} (1 + Q'_e) H_n}{\eta_n} \quad (4.9)$$

де g – прискорення вільного падіння, м/с²;

Q_n – витрата води з урахуванням витоку, м³/с;

Q_{n0} – витрата води без витоку, м³/с;

Q'_e – відносна величина витоку;

H_n – напір на виході з ВНС, м.

Співвідношення споживаних потужностей:

$$\frac{N_{cn.e}}{N_{cn.0}} = (1 + Q'_e) \quad (4.10)$$

Питоме споживання електричної енергії:

без витоку:

$$E_{num,0} = \frac{N_{cn.0} \cdot t}{Q_{n0} \cdot t} = \frac{N_{cn.0}}{Q_{n0}}, \text{ кВт} \times \text{год} / \text{м}^3; \quad (4.11)$$

за наявності витоку:

$$E_{num} = \frac{N_{cn.e}}{Q_n} = \frac{N_{cn.0} (1 + Q'_e)}{Q_{n0} (1 + Q'_e)}, \text{ кВт} \times \text{год} / \text{м}^3, \quad (4.12)$$

тобто $E_{num} = E_{num,0} = \text{const}$.

Економія електроенергії при скороченні терміну ліквідації витоку

$$E_{ел.} = \frac{N_{cn.0}}{Q_{n0}} \cdot Q_e \cdot (t_2 - t_1) \quad (4.13)$$

Представлена вище математична модель дозволяє виконувати техніко-економічне порівняння прогнозованих втрат води при їх локалізації традиційним методом та за запропонованим статистично-гідравлічним методом, а також оцінювати економічні показники за обома варіантами.

4.3. Економічний ефект від використання статистично-гідравлічного методу локалізації прихованих витоків на прикладі водогону м. Кам'янець-Подільський

Вхідні параметрами для аналізу: обсяг поданої води (295,72 м³/год), кількість води, що дійшла до споживача (226,42 м³/год), обсяг витoku (69,3 м³/год), тривалість ліквідації витoku традиційним методом (72 год) та тривалість ліквідації за допомогою статистично-гідравлічного методу (12 год). Питоме енергоспоживання з врахуванням двох підйомів та витрат ел. енергії на очистку становить 0,9159 кВт·год/м³. Річний об'єм піднятої води 5231636 м³/рік, Вартість реагентів для очищення питної води 4373111,63 грн/рік. Для розрахунку грошового еквівалента енергії враховано тариф без ПДВ — 8,24 грн/кВт·год. Загальні витрати на виконання обстеження прийняті як 13 500 грн (три працівники, по три дні роботи з урахуванням оплати та податків).

Економія води при скороченні терміну ліквідації витoku:

$$E_v = Q_v \times (t_{mp} - t_{cm}) = 69.3 \times (72 - 24) = 3326.4 \text{ м}^3$$

Слід окремо зазначити, що питомі енергетичні витрати включають повний ланцюг транспортування води: підйом на ВНС-I, витрати на технологічне очищення (коагуляція, фільтрація, знезараження) та подальший підйом на ВНС-II до кінцевого споживача. Саме тому кожен збережений кубометр води фактично є збереженим ресурсом на всіх етапах виробничо-технологічного циклу.

Економія електроенергії при скороченні терміну ліквідації витoku :

$$E_{ел.} = E_v \cdot N_{um} = 4158 \cdot 0,9159 = 3808,31 \text{ кВт} \cdot \text{год}$$

При тарифі 8,17 грн/кВт·год фінансова економія від зниження споживання електроенергії дорівнюватиме:

$$C_{ел.} = E_{ел.} \cdot 8,24 = 3808,31 \cdot 8,24 = 31379,50 \text{ грн}$$

Розрахунок вартості реагентів для очистки питної води :

$$C_{реаг} = C_{реаг.рік} / W_{річний} = 4373111,63 / 5231636 = 0,83 \text{ грн/ м}^3$$

Економія витрат на очищення питної води:

$$C_{реаг.заг.} = E_v \cdot C_{реаг} = 4158 \cdot 0,83 = 3451,14 \text{ грн}$$

Окрім економії води, електроенергії та реагентів, статистично-гідравлічний метод дозволяє зменшити або повністю уникнути витрат на натурні обстеження мережі, які є необхідними при традиційному способі виявлення витоків. У випадку традиційного підходу такі витрати становили 13 500 грн. Тому фактична перевага впровадження удосконаленого методу ще більша, оскільки він дозволяє не лише уникнути витрат, а й зменшити експлуатаційні витрати на обслуговування мережі.

Сумарна економія підприємства з розрахунку на один осереднений аварійний витік з мережі:

$$E_I = C_{реаг.заг.} + C_{ел.} + C_{з.п.} = 3451,14 + 31379,50 + 13500 = 48330,64 \text{ грн}$$

На прикладі цього кейсу видно, що в умовах постійного зростання вартості енергоресурсів та хімічних реагентів навіть одиничне впровадження статистично-гідравлічного методу може приносити відчутну фінансову вигоду. Якщо ж такий метод застосовувати системно, економічний ефект зростатиме в рази. При річній статистиці у 100 аварійних витоків на рік загальна річна економія підприємства становитиме:

$$E_{річна} = 100 \cdot 48330,64 = 4\,833\,064 \text{ грн.}$$

Цей розрахунок демонструє, що системне застосування статистично-гідравлічного методу локалізації витоків може забезпечити не лише оперативне реагування на аварійні ситуації, але й формує потужний резерв економії для підприємства водопостачання, що має критичне значення в умовах підвищених тарифів та дефіциту ресурсів.

4.4 Висновки

1. Виконано верифікацію розробленого статистично-гідравлічного методу для виявлення прихованих витоків води в натурних умовах, зокрема на магістральних водогонах м. Львів та м. Кам'янець-Подільський Хмельницької обл.

2. За результатами комп'ютерного моделювання для 10 тис. неперервних точкових показів манометрів та витратомірів приведена похибка локалізації витоків на натурних трубопроводах не перевищує 2,0%.

3. Розроблена загальна математична модель визначення економічного ефекту від впровадження статистично-гідравлічного методу локалізації витоків, що враховує економію водних ресурсів за рахунок скорочення термінів ліквідації аварій, а також відповідну економію електроенергії на привід насосів, зменшення затрат праці на обслуговуючий персонал та витрат на очищення води.

4. Середній економічний ефект від використання статистично-гідравлічного методу локалізації прихованих витоків на прикладі водогону м. Кам'янець-Подільський становить близько 48,3 тис. грн. на один аварійний витік, що за фактичної середньої річної кількості 100 витоків відповідає 4,83 млн. грн. на рік.

5. Запропоновані технічні, аналітичні та статистичні підходи дозволяють підвищити ефективність систем раннього виявлення та локалізації прихованих витоків, що покращує техніко-економічні показники роботи водопровідних мереж. Впровадження статистично-гідравлічного методу сприятиме зниженню втрат води, економії енергоресурсів та підвищенню надійності водопостачання в умовах обмежених ресурсів і старіння водогосподарської інфраструктури.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливе науково-практичне завдання розроблення та експериментальної верифікації статистично-гідравлічного методу локалізації прихованих витоків води з магістральних водоводів та ліній зонних водопровідних мереж. Метод дозволяє визначати координати витoku з високою точністю без потреби проведення додаткових розкопувань та встановлення датчиків у проміжних перерізах. Застосування даного підходу дає можливість підвищити оперативність реагування на аварії, зменшити втрати водних ресурсів і скоротити витрати на ремонтно-експлуатаційні заходи. Теоретичні положення методу підтверджено результатами чисельного моделювання та натурних експериментів.

За результатами роботи можна зробити такі загальні висновки:

1. Враховуючи багатofакторність задачі локалізації прихованих витоків у водопровідних мережах, у дисертації виконано планування та реалізацію чисельного й натурального експерименту з визначення точності статистично-гідравлічного методу. Досліджено чутливість методу до зміни вхідних параметрів.

2. Встановлено, що приведена похибка статистично-гідравлічного методу локалізації витoku та її стандартне відхилення визначаються як функції п'яти основних параметрів: безрозмірної витрати витoku, діаметра трубопроводу, площі отвору, надлишкового тиску на ділянці та відносної координати витoku.

3. Розроблено алгоритм автоматизованої локалізації витоків, реалізований у середовищі Microsoft Excel, що дає змогу швидко опрацьовувати вхідні дані та визначати координати витoku без необхідності використання спеціалізованого програмного забезпечення.

4. Отримано рівняння регресії між вхідними параметрами та приведеною похибкою локалізації. Найбільший вплив має відносна

координата виток, дещо менший – діаметр трубопроводу та відносна витрата виток. Площа отвору та тиск на ділянці мають незначний вплив.

5. Виконано теоретичні дослідження похибок у координаті виток на основі π -теорема Бекінгема. Встановлено залежність відносної координати виток X/L як функції 8 безрозмірних комплексів, що дозволяє узагальнити метод для широкого діапазону умов експлуатації водопровідних мереж.

6. Проаналізовано імовірність багатоаварійності на основі моделі незалежних подій Пуассона. Отримано аналітичні залежності для оцінки ймовірності повторних витоків залежно від довжини ділянки, питомої річної аварійності та тривалості локалізаційно-ремонтного процесу.

7. Здійснено натурну перевірку методу на ділянках водогонів у м. Львів та м. Кам'янець-Подільський. За результатами чисельного моделювання пакету з 10 тис. точок похибка локалізації не перевищила 2,0% для високоточного вимірного обладнання та 5,0% для портативного обладнання, що підтверджує надійність методу СГМ.

8. Розроблено математичну модель розрахунку економічного ефекту від впровадження методу, що враховує зменшення витрат води, електроенергії, трудових ресурсів і витрат на очищення. Модель дозволяє прогнозувати річну економію для будь-якого водогону з відомими параметрами аварійності.

9. У процесі апробації на прикладі водоводу м. Кам'янець-Подільський середній економічний ефект від усунення одного виток становив близько 48,3 тис. грн. За умови 100 подібних витоків на рік потенційна економія складає 4,83 млн. грн.

10. Впровадження запропонованого методу забезпечує покращення техніко-економічних показників роботи водопровідних мереж, сприяє зменшенню витрат ресурсів і підвищенню надійності водопостачання, особливо в умовах старіння інфраструктури та обмежених фінансових можливостей підприємств.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ващишак І.Р., Ващишак С.П., Яворський А.В. 2020. Безконтактне виявлення витоків у підземних теплових мережах, 125-132, <http://rrngr.nung.edu.ua/index.php/rrngr/article/view/403>,.
2. Водна Стратегія України на період до 2050 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 9 грудня 2022 р. № 1134-р. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1134-2022-%D1%80#Text>.
3. ДБН В.2.5-74:2013. Водопостачання. Зовнішні мережі та споруди. Основні положення проектування. Київ: Мінрегіонбуд України, 2013.
4. Заміховський Л.М., Штаєр Л.О. 2007. Метод для виявлення витоків з трубопроводу при односторонньому доступі до середовища транспортування. Нафтова і газова енергетика. Івано-Франківськ, <http://library.nung.edu.ua/naftogazovaenergetika.html>
5. Заміховський Л.М., Штаєр Л.О. Контроль витоків з магістральних та технологічних трубопроводів: монографія. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2013. 224 с.
6. Запихляк Н.М., Марчук О.М., Запихляк В.Б., Лукашевич І.І. 2012. Проблеми та перспективи виявлення витоків з трубопроводів. Науковий Вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, <http://elar.nung.edu.ua/bitstream/123456789/2416/1/3215p.pdf>.
7. Колесницький О.К., Лосієв О.А., Мазниця А.С. 2014. Моделювання методу пошуку витоків підземних тр-дів на основі нейронних мереж. Вимірювальні та обчислювальні пристрої в технологічних процесах. Хмельницький Національний університет,
8. Латишев Л.Н., Насирова З.Р. 2006. Система виявлення несанкціонованих підключень в магістральному нафтопроводі. Нафтогазовий бізнес, <http://www.ogbus.ru/authors/Латишев/Латишев1.pdf>,.
9. Методика розрахунку втрат питної води підприємствами, які надають послуги з централізованого водопостачання. Наказ Міністерства

регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України 25.06.2014 № 180.

10. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні за 2020 рік. Міністерство розвитку громад і територій України, 2021.

11. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання в Україні за 2021 рік. Міністерство розвитку громад і територій України, 2022. 326 с.

12. Національна доповідь про якість питної води та стан питного водопостачання та водовідведення в Україні у 2022 р. Міністерство розвитку громад і територій України, 2023

13. Олійник А.П., Штаєр Л.О. Моделювання розподілу тиску в трубопроводі за наявності витоків з використанням формули Даламбера. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2013, 2 (79), 66–71.

14. Попович О.В., Карпаш М.О. 2014. Аналіз акустичного методи ідентифікації та визначення параметрів дефектів металевих конструкцій.

Розвідка та розробка нафти та газові родовища. Івано-

Франківськ <http://library.nung.edu.ua/rozv%D1%96dkata-rozrobka-naftovih-%D1%96-gazovih-rodovishch.html>,.

15. Самойленко, М. І., & Гавриленко, І. О. (2009). Функціональна надійність трубопровідних транспортних систем. Монографія.

16. Штаєр Л.О. Акустичний метод та система контролю витоків з трубопроводів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.11.13 "Прилади і методи контролю та визначення складу речовин".

Івано-Франків. нац. техн. ун-т нафти і газу. Івано-Франківськ, 2010. 20 с.

17. Adedeji, K. B., Hamam, Y., Abe, B. T., & Abu-Mahfouz, A. M. (2017). Towards achieving a reliable leakage detection and localization algorithm for application in water piping networks: An overview. *IEEE Access*, 5, 20272-20285.

18. Ahmad S., Ahmad Z., Kim C.H., Kim J.M. 2022. A Method for pipeline leak detection based on acoustic imaging and deep learning. *Sensors*, 22(4), 1562. <https://doi.org/10.3390/s22041562>.
19. Anfinson, H., & Aamo, O.M. (2022). Leak detection, size estimation and localization in branched pipe flows. *Automatica*, 140, 110213.
20. Aquarius-Spectrum, AQS-SYS Proven automated water-leak monitoring system, <https://aqs-systems.com/> (Accessed 29.04.2025).
21. Babbitt H.E., Amsbary F.C., Gwinn D.R. (1920). The detection of leaks in underground pipes [with discussion]. *Journal (American Water Works Association)*, 7(4), 589–595. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1920.tb12084.x>.
22. Bakhtawar, B., & Zayed, T. (2021). Review of water leak detection and localization methods through hydrophone technology. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 12(4), 03121002.
23. Beuken, R.H.S., Lavooij, C.S.W., Bosch, A., Schaap, P.G. (2008). Low leakage in the Netherlands confirmed. In *Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006* (pp. 1–8).
24. Brkić D. An explicit approximation of the Colebrook equation based on a non-iterative approach // *Petroleum Science and Technology*. – 2011. – Vol. 29, No. 15. – P. 1596–1602.
25. Brunone B., Maietta F., Capponi C., Keramat A., Meniconi S. (2022). A review of physical experiments for leak detection in water pipes through transient tests for addressing future research. *Journal of Hydraulic Research*, 60(6), 894–906. <https://doi.org/10.1080/00221686.2022.2067086>.
26. Chan, T. K., Chin, C. S., & Zhong, X. (2018). Review of current technologies and proposed intelligent methodologies for water distributed network leakage detection. *Ieee Access*, 6, 78846-78867.
27. Chen, J., Feng, X., & Xiao, S. (2021). An iterative method for leakage zone identification in water distribution networks based on machine learning. *Structural Health Monitoring*, 20(4), 1938–1956. <https://doi.org/10.1177/1475921720950470>.

28. Choi, J., Jeong, G., Kang, D. Multiple leak detection in water distribution networks following seismic damage. *Sustainability*. 2021, 13, 8306. <https://doi.org/10.3390/su13158306>.
29. Colombo A.F., Lee P., Karney B.W. (2009). A selective literature review of transient-based leak detection methods. *Journal of Hydro-Environment Research*, 2(4), 212–227. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2009.02.003>.
30. Creaco E., Pezzinga, G. (2018). Comparison of algorithms for the optimal location of control valves for leakage reduction in WDNs. *Water*, 10(4), 466. <https://doi.org/10.3390/w10040466>.
31. Diao, X., Shen, G., Jiang, J., Chen, Q., Wang, Z., Ni, Lei., Mebarki, A., Dou, Z., 2019. Leak Detection and Location in Liquid Pipelines by Analyzing the First Transient Pressure Wave with Unsteady Friction. *J. Loss Prev. Process Ind.* 60, 303-310. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2019.04.017>.
32. Duan H.F., Pan B., Wang M., Chen L., Zheng F., Zhang, Y. (2020). State-of-the-art review on the transient flow modeling and utilization for urban water supply system (UWSS) management. *Journal of Water Supply: Research and Technology – AQUA*, 69(8), 858–893. <https://doi.org/10.2166/aqua.2020.048>.
33. EEA (2018). Water consumption in Europe - quantity and quality facing big challenges.,https://www.researchgate.net/publication/329482267_2018_EEA_European_waters_assessment
34. El-Zahab, S., & Zayed, T. (2019). Leak detection in water distribution networks: an introductory overview. *Smart Water*, 4(1), 1-23.
35. EN 837-1:1996. Pressure gauges. Part 1. Bourdon tube pressure gauges. Dimensions, metrology, requirements and testing.
36. European waters, Assessment of status and pressure 2018, European Environmental Agency, Technical report, no. 7/2018, 2018.
37. Fecser, N., & Lakatos, I. (2022). Developing water supply system in Szőgye. *Pollack Periodica*, 17(1), 94–99.
38. FIDO Tech, (2021),a) Fido, <https://www.fido.tech/>, (Accessed 29.04 2025).

39. Ge J., Zhang Y., Wang Y., Li X. Acoustic detection of leaks in water pipelines using measurements inside pipe // *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*. – 2012. – Vol. 61, No. 1. – P. 1–10. – DOI: 10.2166/aqua.2012.100.
40. Geiger G., Vogt D., Tetzner R. (2006). State-of-the-art in leak detection and localization. *Oil Gas European Magazine*, 32(4), 193.
41. Giudicianni C., Herrera M., di Nardo A., Carravetta A., Ramos H. M., Adeyeye K. (2020). Zero-net energy management for the monitoring and control of dynamically-partitioned smart water systems. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119745. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119745>.
42. GUTERMANN. The Future of Leak Detection Starts Today // GUTERMANN. – 2018. – URL: <https://en.gutermann-water.com/2018/04/04/the-future-of-leak-detection-starts-today/> (дата звернення: 28.04.2025).
43. Günther M., Steffelbauer D.B., Fuchs-Hanusch D. 2016. Fault detection data creation using an experimental water distribution system. In 2016 3rd Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol) (pp. 337–342). <https://doi.org/10.1109/SYSTOL.2016.7739773>.
44. <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29PS.1949-1204.0000574>
45. <https://iwaponline.com/jh/article-abstract/23/4/782/82177>
46. <https://www.interreg-central.eu/Content.Node/Digital-Learning-Resources/03-Water-Loss.pdf>
47. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630719300068>
48. Jin, T., & Zhou, Z.Y. (2014). Multiple leakage detection and localization method based on Bayesian theory and genetic algorithm. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 635, 924–927.
49. Kammoun, M., Kammoun, A., & Abid, M. (2022). Leak detection methods in water distribution networks: a comparative survey on artificial intelligence applications. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 13(3), 04022024.

50. Kayaalp, F., Zengin, A., Kara, R., & Zavrak, S. (2017). Leakage detection and localization on water transportation pipelines: a multi-label classification approach. *Neural Computing and Applications*, 28, 2905-2914.
51. Korlapati, N. V. S., Khan, F., Noor, Q., Mirza, S., & Vaddiraju, S. (2022). Review and analysis of pipeline leak detection methods. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 2(4), 100074.
52. Kwietniewski, M., Świercz, P., & Chudzicki, J. (2022). Modern methods for monitoring water leakages in water networks. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 44(1), 53-65.
53. Lah, A. A. A., Dziyauddin, R. A., & Yusoff, N. M. (2018, July). Localization techniques for water pipeline leakages: A review. In 2018 2nd International Conference on Telematics and Future Generation Networks (TAFGEN) (pp. 49-54). IEEE.
54. Lambert, A. O. (2002). International report: water losses management and techniques. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2(4), 1-20. <https://doi.org/10.2166/ws.2002.0115>.
55. Li, R., Huang, H., Xin, K., & Tao, T. (2015). A review of methods for burst/leakage detection and location in water distribution systems. *Water Science and Technology: Water Supply*, 15(3), 429–441.
56. Liemberger, R., & Wyatt, A. (2019). Quantifying the global non-revenue water problem. *Water Supply*, 19(3), 831-837.
57. Mamlook, R., & Al-Jayyousi, O. (2003). Fuzzy sets analysis for leak detection in infrastructure systems: a proposed methodology. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 6(1), 26-31.
58. Martinek GmbH. (2020). WLM-SYSTEM: An integral and active Water Loss Management – Network monitoring 4.0. Götzis, Austria. Retrieved from https://cdn.martinek.org/martinek/wlm_presentation_en.pdf
59. Martínez-Solano, F.J., Iglesias-Rey, P.L., Arce, S.X.M. (2017). Simultaneous calibration of leakages, demands and losses from measurements. Application to the

- Guayaquil network (Ecuador). *Procedia Engineering*, 186, 397–404. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.237>.
60. Meniconi, S., Capponi, C., Frisinghelli, M., & Brunone, B. (2021). Leak detection in a real transmission main through transient tests: Deeds and misdeeds. *Water Resources Research*, 57(3), e2020WR027838. <https://doi.org/10.1029/2020WR027838>.
61. Mirshafiei, P., Sadeghi-Niaraki, A., Shakeri, M., & Choi, S. M. (2019). Geospatial information system-based modeling approach for leakage management in urban water distribution networks. *Water*, 11(8), 1736. <https://doi.org/10.3390/w11081736>.
62. Mohammed, E. G., Zeleke, E. B., & Abebe, S. L. (2021). Water leakage detection and localization using hydraulic modeling and classification. *Journal of Hydroinformatics*, 23(4), 782–794.
63. Moser, G., Paal, S. G., & Smith, I. F. (2018). Leak detection of water supply networks using error-domain model falsification. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 32(2), 04017077.
64. Muggleton J. M., Brennan M. J., Gao Y. On the filtering of the pipe and sensor in a buried plastic water pipe // *Sensors*. – 2012. – Vol. 12, No. 9. – P. 12102–12115. – DOI: 10.3390/s120912102.
65. Müller R., Baier P., Baumeister J., Ulbig A. Acoustic Leak Detection in Water Networks // *Proceedings of the 13th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2021)*. – 2021. – P. 306–313. – DOI: 10.5220/0010295403060313.
66. Navarro-Díaz, A., Delgado-Aguíñaga, J.-A., Begovich, O., Besançon, G. Two simultaneous leak diagnosis in pipelines based on input–output numerical differentiation. *Sensors* 2021, 21, 8035. <https://doi.org/10.3390/s21238035>
67. Negm, A., Ma, X., & Aggidis, G. (2023). Review of leakage detection in water distribution networks. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1136, No. 1, p. 012052). IOP Publishing.

68. Nugroho, W., Iriawan, N., Utomo, C. (2021). Determining physical and operational factors influencing pipeline leakage location pattern in water distribution networks using spatial Poisson point process. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1098, No. 2, p. 022051).
69. OECD (2012). OECD Environmental Outlook to 2050: The Consequences of Inaction, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264122246-en>.
70. Puust, R., Kapelan, Z., Savic, D. A., & Koppel, T. (2010). A review of methods for leakage management in pipe networks. *Urban Water Journal*, 7(1), 25-45.
71. Rak, J.R., Sypień, Ł. (2013). Analiza strat wody w wodociągu miasta Jasła. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury*, 60(3), 5–18. (in Polish)
72. Remeshevska, I., Trokhymenko, G., Gurets, N., Stepova, O., Trus, I., & Akhmedova, V. (2021). Study of the ways and methods of searching water leaks in water supply networks of the settlements of Ukraine. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 22.
73. S. Zhou, Z. O'Neill, and C. O'Neill, "A review of leakage detection methods for district heating networks," *Applied Thermal Engineering*, vol. 137, pp. 567–574, 2018.
74. Sekhavati, J., Hashemabadi, S. H., & Soroush, M. (2022). Computational methods for pipeline leakage detection and localization: A review and comparative study. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 104771.
75. Seraphin J., Brkić D., Soldo B. A review of explicit approximations of Colebrook's equation // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2014. – Vol. 122. – P. 741–753.
76. Silva M., Ghazali A., Ahmad Z., Ismail A. Acoustic emission-based leak detection in water pipelines: A review // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. – 2012. – Vol. 25, No. 3. – P. 507–513. – DOI: 10.1016/j.jlp.2011.12.004.

77. Siemens AG. (2015). SIWA Leak Control: Intelligent Leak Detection for Water Supply Networks. Retrieved from <https://references.siemens.com/en/reference?id=Refp9949>
78. Shapoval, S., Zhelykh, V., Spodyniuk, N., Dzeryn, O., & Gulai, B. (2019). The effectiveness to use the distribution manifold in the construction of the solar wall for the conditions of circulation. *Pollack Periodica*, 14(2), 143–154.
79. Shtaier L.O. 2010. Acoustic method and pipeline leak control system for leaks: author's abstract of Ph.D. thesis in Engineering Science: 05.11.13. Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. Ivano-Frankivsk, pp. 20, <http://elar.nung.edu.ua/handle/123456789/4410> [Accessed: 14.09.2020].
80. Tevyashev A., Matviyenko O., Nikitenko G. (2019). Construction of a stochastic model for a water supply network with hidden leaks and a method for detecting and calculating the leaks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(4), 29–38. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.186157>.
81. V. Zhuk and T. Bodnar, “Probability of simultaneous multiple leakages at sections of water networks in the process of localization of hidden water leaks,” *Theory and Building Practise*, vol. 5, no. 1, pp. 72–83, 2023.
82. Verde C., D’Amato M., Ferrara V. Leak detection in water distribution networks using a model-based approach // *Procedia Engineering*. – 2012. – Vol. 70. – P. 389–398. – DOI: 10.1016/j.proeng.2014.02.043.
83. Wang, X. J., Lambert, M. F., Simpson, A. R., Liggett, J. A., & Vitkovský, J.P. (2002). Leak detection in pipelines using the damping of fluid transients. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(7), 697–711.
84. Wang, X. J., Simpson, A. R., Lambert, M. F., & Vitkovský, J. P. (2001). Leak detection in pipeline systems using hydraulic methods: A review. In *Conference on Hydraulics in Civil Engineering*, The Institution of Engineers, Australia, Hobart (pp. 23-30).
85. Wang, X., & Ghidaoui, M. S. (2018). Identification of multiple leaks in pipeline: Linearized model, maximum likelihood, and super-resolution localization. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 107, 529–548.

86. Water Efficiency for Water Suppliers. US Environmental Protection Agency, accessed September 24, 2021, [epa.gov](https://www.epa.gov/);
87. Weissenbrunner A., Fiebach A., Schmelter S., Bär M., Thamsen P.U., Lederer T. (2016). Simulation-based determination of systematic errors of flow meters due to uncertain inflow conditions. *Flow Measurement and Instrumentation*, 52, 25-39. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2016.07.011>
88. WWT. (2021). Affinity Water achieves lowest ever leakage levels. Water & Wastewater Treatment. Retrieved from <https://www.wwtonline.co.uk/news/affinity-water-achieves-lowest-ever-leakage-levels>
89. Zaman, D., Tiwari, M. K., Gupta, A. K., & Sen, D. (2020). A review of leakage detection strategies for pressurised pipeline in steady-state. En

ДОДАТКИ

Додаток А. Список опублікованих праць за темою дисертації

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 виданні 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.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної роботи

Національного університету

«Львівська політехніка»

доц. Олег ДАВИДЧАК

05 2025 р.



**про впровадження в навчальний процес результатів дисертаційної роботи
Боднара Тараса Сергійовича на тему «Локалізація прихованих витоків на
магістральних водоводах і зонних водопровідних мережах» на здобуття
наукового ступеня доктора філософії**

Комісія у складі: голови науково-методичної ради Інституту будівництва та інженерних систем к.т.н., доц. Позняк О.Р., завідувача кафедри гідротехніки та водної інженерії, д.т.н., проф. Чернюка В.В., заступника директора ІБІС з навчальної роботи, доцента кафедри гідротехніки та водної інженерії, к.т.н., доц. Попадюка І.Ю. склали акт про те, що результати дисертаційної роботи Боднара Тараса Сергійовича на тему «Локалізація прихованих витоків на магістральних водоводах і зонних водопровідних мережах», виконаної за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія», впроваджені та використовуються в навчальному процесі кафедри гідротехніки та водної інженерії. Результати дисертаційної роботи впроваджені в лекційних і практичних заняттях з дисципліни «Експлуатація систем водопостачання та водовідведення» для студентів спеціальності 192 «Будівництво та цивільна інженерія» (загальний обсяг аудиторних годин для денної форми навчання – 30, у т.ч. лекційні заняття – 15, практичні заняття – 15) за темою №4 «Облік водоспоживання та оцінка втрат води», а також з дисципліни «Інноваційні технології у гідротехнічному будівництві» для студентів спеціальності 194 «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології» (загальний обсяг аудиторних годин для денної форми навчання – 60, у т.ч. лекційні заняття – 30, практичні заняття – 30) за темою №13 «Сучасні технології контролю споживання води та контроль за станом водопровідної мережі». Використання результатів наукових досліджень Боднара Т.С. сприяє вдосконаленню підготовки фахівців ОКР «магістр» за спеціальностями 192 «Будівництво та цивільна інженерія» та 194 «Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології».

Голова науково-методичної
ради ІБІС, к.т.н., доц.

Завідувач кафедри ГВІ, д.т.н., проф.

Заст. директора ІБІС, к.т.н., доц.

Оксана ПОЗНЯК

Володимир ЧЕРНЮК

Ігор ПОПАДЮК



Львівська міська рада

Львівське міське комунальне підприємство «Львівводоканал»

79017, м. Львів, вул. Зелена, 64, тел.: (032) 275-34-39, тел./факс: (032) 276-74-07, www.lvivvodokanal.com.ua

№ _____

На № _____ від _____

від 18.03.2025 р.

АКТ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

Результатів дисертаційної роботи Боднара Т.С.

Комісія у складі представників ЛМКП «Львівводоканал»: головний інженер Анатолій ШИМОНЯК, заст. головного інженера Володимир БІЛИНСЬКИЙ, начальник відділу ГІС та пошуку прихованих витоків Юрій РАСЯК склали цей акт про впровадження наукових розробок аспіранта кафедри гідротехніки та водної інженерії Національного університету «Львівська політехніка» Боднара Тараса Сергійовича, які є частиною його дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії на тему «Локалізація прихованих витоків на магістральних водоводах і зонних водопровідних мережах».

Обґрунтований Боднаром Т.С. метод дозволяє значно скоротити час між моментом виникнення прихованого витoku та його виявленням і ліквідацією. Завдяки можливості точного визначення ділянки пошуку стає можливим локалізувати прихований витік у межах 8–16 годин від моменту його виникнення, що на практиці можливо в середньому за 3 доби.

Впровадження інноваційного методу локалізації витоків сприяє значному зниженню втрат водних ресурсів, оптимізації енергоспоживання насосних станцій та зменшенню витрат на аварійне обслуговування мережі, що у сукупності забезпечує високий економічний ефект і сприяє покращенню ефективності водопостачання в місті.

Цей акт впровадження не є підставою для фінансових розрахунків.

Головний інженер
ЛМКП «Львівводоканал»

Анатолій ШИМОНЯК

Заступник головного інженера
з експлуатації та ремонту
водопровідних мереж

Володимир БІЛИНСЬКИЙ

Начальник відділу ГІС
та пошуку прихованих витоків

Юрій РАСЯК

127605



**КОМУНАЛЬНЕ ПІДПРИЄМСТВО
«МІСЬКТЕПЛОВОДЕНЕРГІЯ»**

вул. Ярослава Мудрого, буд. 123 м. Кам'янець-Подільський, Хмельницька обл., 32300
тел.: (03849) 5 04 90 (приймальня), 3 02 91 (бух.), 5 11 01 (збут), 5 04 14 (ВТВ), 5 04 50 (ВК)
e-mail: kp-mtve@ukr.net, web: mtve.kp.km.ua код ЄДРПОУ 36588183

№ від 18.09.2024

на № _____ від _____

АКТ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Боднара Т.С.

Комісія у складі представників КП «Міськтепловоденергія»: головний інженер Тарасюк В.К., начальник ВТВ Гуль П.А, начальник Дністровського водогону Гордійчук О.І. склали цей акт про впровадження наукових розробок аспіранта кафедри гідротехніки та водної інженерії Національного університету "Львівська політехніка" Боднара Тараса Сергійовича, які є частиною його дисертаційної роботи на здобуття наукового ступеня доктора філософії на тему "Локалізація прихованих витоків на магістральних водоводах і зонних водопровідних мережах".

Обґрунтований Боднаром Т.С. статистично-гідравлічний метод дозволяє значно скоротити час між моментом виникнення витoku та його виявленням і ліквідацією. Завдяки можливості точного визначення ділянки пошуку стає можливим локалізувати прихований витік у межах 3–4 годин від моменту його виникнення, а повну ліквідацію витoku здійснити за 8–16 годин, тоді як з використанням традиційних підходів це потребує 3–4 доби. Впровадження інноваційного методу локалізації витоків сприяє значному зниженню втрат водних ресурсів, оптимізації енергоспоживання насосних станцій та зменшенню витрат на аварійне обслуговування мережі, що у сукупності забезпечує високий економічний ефект і сприяє покращенню ефективності водопостачання в місті.

Цей акт впровадження не є підставою для фінансових розрахунків.



Головний інженер

КП «Міськтепловоденергія»

Нач. ВТВ

Нач. Дністровського водогону

В.К.Тарасюк.

П.А.Гуль.

О.І.Гордійчук.