
Огляд сучасного стану методів контролю витоків з трубопроводів

Юрій Безгачнюк

Кафедра комп'ютерних систем і мереж, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна
ORCID 0009-0007-9072-908X

Лідія Штаєр

Кафедра інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна
ORCID 0000-0003-1013-9869

Для цитування цієї статті:

Безгачнюк Юрій, Штаєр Лідія. Огляд сучасного стану методів контролю витоків з трубопроводів. International Science Journal of Engineering & Agriculture. Vol. 3, No. 3, 2024, pp. 43-50. doi: 10.46299/j.isjea.20240303.04.

Надійшла до редакції: 05 травня 2024 р.; **Схвалено:** 29 травня 2024 р.;

Опубліковано: 01 червня 2024 р.

Анотація: Актуальною проблемою трубопровідного транспорту є контроль витоків з трубопроводів. Незважаючи на значну кількість робіт в цьому напрямі статистика аварій, які трапляються на газо-, нафто- та продуктопроводах, вражає, а існуючі методи та системи контролю витоків або дороговартісні для впровадження, або володіють не достатньою чутливістю для виявлення можливих витоків, особливо “малих”. Основними критеріями вибору методу і, відповідно, системи, яка його реалізує, є матеріал трубопроводу, доступ до нього, можливість моніторингу стану трубопроводу та точність локалізації витoku. Робота містить аналіз сучасного стану методів контролю витоків та систем, які їх реалізують. Системи контролю витоків, які є популярними на ринку, часто поєднують кілька методів контролю для покращення точності результату контролю, наприклад, система виявлення витоків PipePatrol, яка об'єднує технологію динамічного моделювання в режимі реального часу (балансовий метод контролю витрати) із запатентованим модулем розпізнавання моделей витоків. Проте такий підхід не є універсальним, особливо при зміні режиму транспортування, що супроводжується локальними змінами тиску та витрати. Перспективними методами контролю витоків, що незалежні від середовища транспортування, є акустичні методи контролю, які супроводжуються створенням тестових коливань в середовищі транспортування та реєструванні відбитих коливань від неоднорідностей трубопроводу. Наведено характеристику найпоширеніших методів та систем, вказано на обмеження в їх використанні. Виділено перспективний напрямок подальших досліджень, який полягає в забезпеченні ефективного контролю за станом трубопроводів на основі розширення інформативних складових діагностичних сигналів в тестовому акустичному методі контролю витоків з трубопроводу.

Ключові слова: контроль витоків, трубопровід, технічний стан, методи контролю витоків, опрацювання сигналів.

1. Вступ

Трубопроводи вважаються одним з найбезпечніших та економічних способів транспортування природного газу, нафти, продуктів промислової переробки та інших речовин. Проте поява витоків на трубопроводах, причинами яких є, зокрема, корозія, неякісне зварювання, несанкціонований доступ, веде до значних екологічних, економічних, а часто і людських втрат. Наприклад, в [1] зазначено, що згідно висновків Європейської Групи (EGIG), ймовірність появи витоків через неякісне зварювання становить 5 % від загальної кількості фактів появи витоків з трубопроводів, тоді як 50 % – це аварії, які спричинені втручанням сторонніх осіб. Ключовим в даному контексті є швидкість виявлення витoku. Саме тому проблема пошуку витоків з трубопроводів не втрачає актуальності. Підтвердженням цьому є значна кількість публікацій [1-5], які містять як статистику аварійних ситуацій, пов'язаних з витокami з трубопроводів, так і різноманітні класифікації методів контролю витоків.

Існуючі методи і засоби потребують постійного вдосконалення, що зумовлено матеріальними та екологічними втратами при експлуатації трубопровідних систем. Складність проведення діагностичних робіт також пов'язана із значними розмірами та територіальною рознесеністю об'єктів контролю, що потребує забезпечення автономності та компактності таких комп'ютерних систем.

Зважаючи на викладене вище, до важливих наукових та практичних завдань експлуатації трубопровідного транспорту слід віднести дослідження та впровадження перспективних методів опрацювання діагностичних сигналів в системах контролю витоків.

2. Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження є системи контролю витоків з трубопроводів.

Предметом досліджень є методи опрацювання сигналів в системах контролю витоків з трубопроводів, а також шляхи їх вдосконалення для розширення інформативних складових сигналів діагностування.

3. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є вивчення існуючого світового досвіду для створення новітніх підходів в опрацюванні діагностичних сигналів в системах контролю витоків, що веде до підвищення ефективності локалізації витоків з трубопроводів. Для досягнення поставленої мети необхідно провести аналіз існуючих методів виявлення витоків з трубопроводів та способів обробки діагностичних сигналів з метою обґрунтування вибору методів, які дозволяють розширити інформативні складові сигналів діагностування.

4. Аналіз літератури

Авторами [2] виділено наступні групи методів контролю витоків: зовнішні методи (виявлення витоків ґрунтується на неалгоритмічному принципі фізичного виявлення викиду речовини за допомогою спеціальних зовнішніх давачів – акустичні давачі, оптоволоконний кабель, і т.д.); візуальні / інспекційні методи (плануються на регулярних інтервалах часу для проведення людьми або навченими собаками візуального огляду на землі, роботами для інспекції морських трубопроводів та повітряними засобами для повітряного нагляду) та внутрішні / обчислювальні методи (працюють на основі моделей або алгоритмічних принципів, які відстежують параметри потоку в реальному часі – балансовий метод, статистичний аналіз, метод аналізу хвиль тиску і т.д.). В роботі також зазначено, що на практиці частіше зустрічаються поєднання кількох методів контролю витоків та вказано на

необхідність пошуку нових та вдосконалення існуючих методів відновлення сигналу за допомогою алгоритмів машинного навчання. Прикладом такого поєднання може слугувати система виявлення витоків PipePatrol [6], яка об'єднує технологію динамічного моделювання в режимі реального часу (балансовий метод контролю витрати) з запатентованим модулем розпізнавання моделей витоків. Проте такий підхід не є універсальним, особливо при зміні режиму транспортування, що супроводжується локальними змінами тиску та витрати.

Класифікація, наведена в [4], демонструє розподіл методів виявлення витоків з підземних газопроводів за ознаками доступності: контактні (методи патрулювання, буровий огляд, акустичний, оптичний) та дистанційні (за тепловими зображеннями місцевості, лазерний, радіолокаційний, спектральний), тоді як в [5] класифікаційним критерієм є фізична природа процесу, який лежить в основі методу: електромагнітні (магнітні, вихрових струмів, комбінований); реєстрація та аналіз звукових коливань (акустико-емісійний, акустичний, вібро-акустичний, оптоволоконний); дистанційні (за визначенням гідравлічного нахилу, порівняння витрат, лінійного балансу); візуальний контроль; аналіз складу оточуючого середовища; пропускання зондів; гідравлічні випробування; метод ударної хвилі. Кожен з наведених методів володіє своїми перевагами та недоліками, проте на точність виявлення витоків значним чином впливає алгоритм опрацювання діагностичної інформації, здобутої в процесі використання методу.

5. Методи досліджень

Для досягнення поставлених мети та завдання в роботі використано такі методи досліджень: аналіз науково-технічної літератури та інформаційних матеріалів із баз мережі Інтернет за тематикою роботи, порівняльний аналіз, методи експертної оцінки для ідентифікації перспективних напрямів вдосконалення процесу опрацювання діагностичних сигналів в системах контролю витоків.

6. Результати досліджень

Для вибору методу виявлення витоків та способів обробки діагностичної інформації важливо розуміти можливі розміри витоків. Аварійні витокі поділяються на “великі” та “малі”. “Малими” вважаються ті витокі газу, розмір яких не перевищує 1% номінальної пропускної здатності газопроводу [5] (що відповідає діаметру 5-10 мм, який відповідає розмірам наскрізних корозійних свищів). Вони мають невеликий вплив на параметри режиму роботи трубопроводу, тому їх важко виявити [1], але можуть призвести до значної втрати продукту і значного забруднення середовища за рахунок тривалого їх існування. На відміну від цього, “великі” витокі мають відчутний вплив на роботу трубопроводу і можуть бути швидко виявлені та локалізовані.

За даними [5] витокі можуть бути лише щілинного або круглого типу. На практиці зазвичай спостерігаються тільки малі та великі втрати нафти. Величина втрат залежить від розмірів та форми отвору, а також від параметрів рідини, таких як в'язкість і тиск. При різних умовах величина втрат зростає зі збільшенням розміру отвору та тиску, особливо це стосується щілинних отворів. Деякі щілинні тріщини можуть викидати речовину лише при певних розмірах та тисках, а при меншому розмірі витікання зупиняється, оскільки отвори затягуються парафіном і механічними домішками, що містяться в продукті транспортування.

Проведений аналіз відомих методів контролю витоків дозволяє класифікувати їх за типом діагностування так, як показано на малюнку 1.



Рис 1. Класифікація методів контролю витоків з трубопроводів за типом діагностування.

Перспективними методами контролю витоків, які є незалежними від середовища транспортування, є акустичні методи контролю (рис. 1), які супроводжуються створенням тестових коливань в середовищі транспортування та реєструванні відбитих коливань від неоднорідностей трубопроводу. Наприклад, відомим є спосіб локалізації місця витоків речовини з трубопроводу, який полягає у створенні тестового сигналу з первинних хвиль тиску в межах рідкого або газоподібного середовища транспортування та обробці відбитих сигналів, які ідентифікують зміну стану трубопровідної системи [7]. Первинні хвилі розповсюджуються зі швидкістю звуку в межах середовища, зумовлюючи генерацію вторинних відбитих хвиль на неоднорідностях (відгалуженнях трубопроводу, витоках, запірній арматурі, різких згинах і т.д.) трубопроводу. Прийняті датчиком тиску системи вторинні відбиті хвилі, перетворені в електричні, а далі – в цифрові сигнали, після обробки за допомогою алгоритму обчислення автокореляційної функції, формують в пам'яті мікропроцесорного пристрою імпульсну характеристику трубопроводу, яка дозволяє виявити всі значні його неоднорідності. Імпульсна характеристика трубопроводу містить в собі всю інформацію про неоднорідності, включаючи топологію трубопроводу та фізичні характеристики речовини, що транспортується. Для виявлення нових неоднорідностей система за допомогою мікропроцесорної програми здійснює віднімання експериментальної імпульсної характеристики від еталонної, формуючи різницеву імпульсну характеристику. При цьому із експериментальної імпульсної характеристики усуваються відомі неоднорідності, зумовлені топологією трубопроводу і залишаються тільки нові неоднорідності, виявлені під час вимірювання.

На основі проведеного аналізу методів виявлення витоків з трубопроводів запропоновано класифікацію, показану на малюнку 2, в якій за класифікаційну ознаку обрано алгоритм опрацювання діагностичних сигналів.

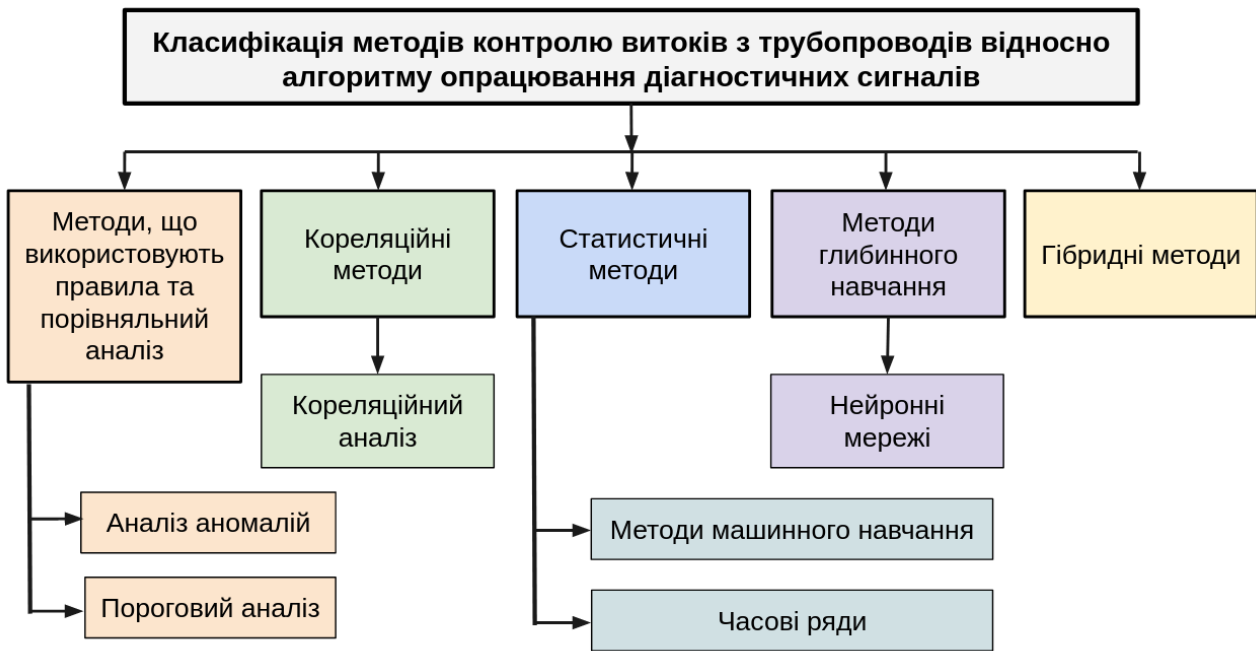


Рис 2. Класифікація методів контролю витоків з трубопроводів за алгоритмом опрацювання діагностичних сигналів.

Пояснення суті підходів до опрацювання сигналів за вказаними на малюнку 2 методами із прикладами реалізацій:

– **аналіз аномалій:** виявлення аномалій в діагностичному сигналі за допомогою порівняльного аналізу з нормальними шаблонами [7];

– **пороговий аналіз:** встановлення порогів або меж, за якими визначається, чи є дані аномальними або нормальними;

– **кореляційний аналіз:** аналіз залежності між двома чи більше різними часовими рядами для виявлення схожих патернів або аномалій, наприклад цифрова система виявлення і локалізації витоків [8];

– **методи машинного навчання:** використання алгоритмів класифікації, кластеризації або регресії для виявлення витоків [9];

– **часові ряди:** аналіз змін у часі для виявлення відхилень від звичайних патернів [10] (запропонована діагностична модель, яка не ґрунтується на формі сигналу витoku, амплітуді чи розподілі енергії у частотній області, а використовує статистичні характеристики у часовій області від акустичних датчиків) та [11] (метод локалізації витоків на основі акустико-вібраційних сигналів витоків, які сегментуються як у часовій, так і у частотній областях, а ідентифікація позиції витoku досягається за допомогою алгоритму різниці часу прибуття разом зі статистичним аналізом);

– **нейронні мережі:** використання нейронних мереж для автоматичного виявлення витоків у діагностичних сигналах [12];

– **гібридні методи:** комбінація різних методів для покращення точності та ефективності виявлення витоків.

Зважаючи на проведений аналіз методів опрацювання діагностичних сигналів перспективним напрямом подальших досліджень є спроба розширити інформативні складові діагностичних сигналів в тестовому акустичному методі контролю витоків з трубопроводу. Даний підхід може ґрунтуватись на поєднанні кореляційних та статистичних методів пошуку витоків. Зважаючи на те, що вказаний акустичний метод передбачає формування тестового сигналу, то за технічною суттю прототипом підвищення інформативності діагностичного сигналу є спосіб передавання та приймання інформації на основі широкосмугових сигналів,

що формуються процесами зі змінною ентропією розподілу ймовірностей станів [13]. Суть способу полягає у тому, що при формуванні широкосмугових сигналів використовують випадкові процеси, ентропію розподілу ймовірностей станів яких ставлять у відповідність до елементів завадостійкого тестового сигналу, який поширюється в середовищі транспортування. При прийманні проводять обробку прийнятого сигналу. Обробка полягає у статистичному оцінюванні ентропії його послідовних фрагментів, що відповідають інтервалам елементів тестового сигналу.

Використанню підходу до підвищення ефективності розпізнавання сигналу (зокрема, відбитого сигналу від витоків) на основі ентропії послідовних фрагментів сигналів, що забезпечує суттєве зменшення об'єму обчислень та збільшення ефективності аналізу, присвячено [14]. Те, що значення оцінок ентропії послідовних фрагментів досліджуваного сигналу змінюються в залежності від його характеристик, дозволяє в процесі обробки сигналу сформувати ентропійну характеристику фіксованої послідовності його фрагментів. Внаслідок порівняння отриманої характеристики з еталонними взірцями здійснюється розпізнавання сигналу.

В роботі [15] розглянуто вплив потужності сигналу на ентропійні оцінки у випадку використання різних аналітичних підходів для їх розрахунку та показано переваги використання ентропійних представлень у порівнянні з іншими методами статистичного опрацювання. Зокрема доведено, що зменшення потужності сигналу мало впливає на апертуру оцінок ентропії, що є суттєвим в системах контролю витоків, які ґрунтуються на ідентифікації відбитого сигналу від неоднорідності.

Отже, з результатів проведеного аналізу можна зробити висновок про перспективність подальшого дослідження та застосування імовірнісної складової сигналів при опрацюванні діагностичних сигналів в методах контролю витоків.

7. Перспективи подальшого розвитку досліджень

Одним із можливих варіантів вдосконалення аналітичних, структурних та алгоритмічних, а також апаратних засобів цифрових систем діагностування та їх компонентів може бути використання оцінок інформаційної ентропії, що дозволяє розширити інформативні складові сигналів діагностування. Подальші дослідження будуть спрямовані на вивчення процесу детектування параметричних змін діагностичних сигналів, що виникають за наявності витоків у трубопроводах. Буде проведено математичне моделювання та досліджено методи формування та цифрового опрацювання псевдовипадкових діагностичних сигналів на основі оцінок інформаційної ентропії їх фрагментів.

8. Висновки

Аналіз відомих методів контролю витоків з трубопроводів виявив обмеження в їх застосуванні, а саме: залежність від матеріалу тіла труби, можливості доступу до трубопроводу (односторонній чи багатоточковий), продукту транспортування, можливість формування тестових сигналів в середовищі транспортування або контроль зміни параметрів, періодичність контролю і т.д. Існуючі методи виявлення витоків мають обмеження щодо точності, ефективності або є складними і дорогими для впровадження. Ключовим для забезпечення ефективності контролю за станом трубопроводів є спосіб обробки діагностичних сигналів. Вдосконалені методи виявлення витоків, такі як акустичні методи, пропонують покращені можливості виявлення витоків. Інтеграція декількох методів може підвищити точність та якість контролю. Перспективним напрямом подальших досліджень є розроблення методів та алгоритмів опрацювання діагностичних сигналів в інформаційно-вимірювальних комп'ютерних системах на основі розширення

інформативних складових діагностичних сигналів з метою забезпечення ефективного контролю за станом трубопроводів, зокрема в акустичних методах виявлення витоків.

Список літератури:

- 1) Дорошенко, Я. В. (2020). Моделювання витікань газу з газопроводів в аварійних ситуаціях. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, (3), 22-28.
- 2) 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), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jpse.2022.100074>. Вилучено із <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667143322000464?via%3Dihub>
- 3) Болонний, В. Т. (2020). Зміна режимних параметрів магістральних нафтопроводів в умовах розгерметизації. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, (74), 26-35.
- 4) Вакалюк, Я. І. & Карпаш, О. М. (2013). Вибір методу визначення місць витоків газу з підземних газопроводів. *Методи та прилади контролю якості*, (30), 55-63.
- 5) Заміховський, Л. М. & Штаєр Л. О. (2013). *Контроль витоків з магістральних та технологічних трубопроводів*. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ.
- 6) *PipePatrol Leak Detection. Pipeline Management Solutions For Liquid, Gas And Multiproduct Pipelines, On- And Offshore*. (2024). Вилучено з <https://pipeline-management.com/leak-detection/>
- 7) Заміховський, Л. М., Ровінський В. А. & Штаєр Л. О. (2008). *Спосіб локалізації місця витoku речовини з трубопроводу та система для його здійснення* (Пат. 83290 Україна, МПК G 01 N 29/04, G 01 M 3/24), (12). Вилучено з <https://uapatents.com/4-83290-sposib-lokalizaci-miscya-vitoku-rechovini-z-truboprovodu-ta-sistema-dlya-jjogo-zdijjsnennya.html>
- 8) *Enigma. Цифрова система виявлення і локалізації витоків*. (2024). Вилучено з https://geo-laser.com.ua/ua/index.php?route=product/product&path=14&product_id=243
- 9) Linjile, A., Younis, M., Kim, S.-J. & Lee, S. (2019). *Exploiting multi-modal sensing for increased detection fidelity of pipeline leakage*. In: *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference ASME 2019 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. IDETC-CIE 2019, Anaheim, CA, United States.
- 10) Wang, F., Lin, W., Liu, Z., Wu, S. & Qiu, X. (2017). *Pipeline Leak Detection by Using Time-Domain Statistical Features*. *IEEE Sens. J.* 17 (19), 6431–6442. doi: 10.1109/JSEN.2017.2740220 .
- 11) Kousiopoulos, G.-P., Kampelopoulos, D., Karagiorgos, N., Papastavrou, G.-N., Konstantakos, V. & Nikolaidis, S. (2022). *Acoustic leak localization method for pipelines in high-noise environment using time-frequency signal segmentation*. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 71. doi: 10.1109/TIM.2022.3150864 .
- 12) Yilmaz, Y. (2021). *New rupture detection data mining algorithms for crude oil pipelines*. PSIG Annual Meeting. Вилучено з: <https://onepetro.org/PSIGAM/proceedings-abstract/PSIG21/All-PSIG21/463590>
- 13) Мельничук, С. І. & Козленко, М. І. (2007) *Спосіб передавання та приймання інформації* (Пат. 81017 Україна, МПК(2006) H04B1/69), (19). Вилучено з: <https://uapatents.com/2-81017-sposib-peredavannya-ta-prijjmannya-informaci.html>
- 14) Мельничук, С. І. & Федоришин, М. Г. (2009). *Спосіб розпізнавання дискретних сигналів* (Пат. 88641 Україна, МПК(2009) G06K 9/00, G06F 19/00), (21). Вилучено з: <https://uapatents.com/3-88641-sposib-rozpiznavannya-diskretnikh-signaliv.html>
- 15) Мельничук, С. І. & Василик, В. М. (2011). Можливості використання оцінок ентропії при опрацюванні сигналів в інформаційних діагностичних системах. *Вісник Хмельницького національного університету*. (177), 175-179.

Overview of Modern Leak Detection Methods for Pipelines

Yurii Bezghachniuk

Department of Computer Systems and Networks, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine
ORCID 0009-0007-9072-908X

Lidiia Shtaiier

Department of Information and Telecommunication Technology and Systems, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine
ORCID 0000-0003-1013-9869

Abstract: The control of leaks in pipelines remains a significant issue in pipeline transportation. Despite numerous efforts in this direction, the statistics of accidents occurring on gas, oil, and product pipelines are alarming. Existing leak detection methods and systems are either costly to implement or lack sufficient sensitivity to detect potential leaks, especially "small" ones. The primary criteria for selecting a method and, consequently, the system implementing it, include the pipeline material, accessibility, the ability to monitor the pipeline's condition, and leak localization accuracy. This paper presents an analysis of the current state of leak detection methods and the systems implementing them. Popular leak detection systems often combine multiple control methods to improve the accuracy of the control results, such as the PipePatrol leak detection system, which integrates real-time dynamic modeling technology (mass balance leak detection method) with a patented leak pattern recognition module. However, such an approach is not universal, especially when there are changes in transportation conditions accompanied by local pressure and flow rate changes. Promising leak detection methods that are independent of the transported substance include acoustic monitoring methods, which involve creating test acoustic waves in the transported medium and recording reflected waves from pipeline irregularities. The characteristics of the most common methods and systems are provided, along with their limitations in usage. A promising direction for further research is identified, focusing on ensuring effective pipeline condition monitoring by expanding the informative components of diagnostic signals in the acoustic leak detection method from pipelines.

Keywords: Leakage Control, Pipeline, Technical Condition, Methods of Leakage Control, Signal Processing.
