

681.51
Ш84

ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ НАФТИ І ГАЗУ

Штаєр Лідія Омелянівна



УДК 681.518.5:621.643.8

**АКУСТИЧНИЙ МЕТОД ТА СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ВИТОКІВ З
ТРУБОПРОВОДІВ**

Спеціальність 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення
складу речовин

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Івано-Франківськ – 2010

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України



Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Заміховський Леонід Михайлович,
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, завідувач кафедри комп'ютерних технологій в системах управління та автоматики

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Ігуменцев Євген Олександрович,
Українська інженерно-педагогічна академія м. Харків,
завідувач кафедри систем управління технологічними процесами і об'єктами

кандидат технічних наук, доцент

Лютак Зіновій Петрович,

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, професор кафедри методів та приладів

Захист ві
спеціалізованої
технічному унів
вул. Карпатська,
3 дисерта
національного те
вул. Карпатська,

і засіданні
ціональному
Франківськ,
анківського
Франківськ,

Авторефера

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

М. М. Дранчук



АГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Україна має одну з найбільших у Європі нафто- і газотранспортну систему, яка подає газ і нафту споживачам України та у 15 країн Центральної і Західної Європи. Однією з причин зміни технічного стану трубопроводів є поява витоків, які зумовлені виникненням і розвитком дефектів, метеорологічними умовами, пошкодженням або неякісним проведенням ремонтних робіт, просіданням ґрунту чи несанкціонованими врізаннями. За останні роки збільшилася кількість випадків несанкціонованого відбору енергоносіїв (газ, дизпаливо, нафта тощо), що приносить державі не лише значні економічні збитки, але й забруднення довкілля. Останнє обумовлено тим, що не завжди особи, які здійснюють несанкціоноване врізання, мають можливість справитися з тиском продукту в трубопроводі.

Існуючі сьогодні методи і технічні засоби не дозволяють отримувати оперативну інформацію про місце появи витoku (в т.ч. несанкціонованого відбору) з магістрального та технологічного трубопроводу, у зв'язку з чим зростають матеріальні та екологічні втрати. Неможливість проведення ефективного контролю витоків часто зумовлена складністю конфігурації технологічної об'єкту та значним рівнем шуму в середовищі, яке оточує трубопровід.

Тому розробка методів і засобів оперативного контролю за появою витоків з магістральних та технологічних трубопроводів є актуальною науково-технічною проблемою, яка має важливе народногосподарське значення. Проблема підвищення надійності експлуатації трубопроводів та впровадження методів виявлення витоків займались у свій час та займаються зараз Щербаків С.Г., Іонін Д.О., Яковлев Є.І., Грудз В.Я., Середюк М.Д., Заміховський Л.М., Ігуменцев Є.О., Ledeen H. L., Botting R. J., Hastings C. R. та інші.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основний зміст роботи складають результати наукових розробок та експериментальних досліджень, які проводились у 2004-2010-му роках на кафедрі комп'ютерних технологій в системах управління та автоматики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ). Тематика роботи є частиною планових науково-дослідних програм по розвитку нафтопромислового комплексу України і базується на результатах держбюджетних науково-дослідних робіт «Розроблення методики діагностування установок нафтогазової промисловості», номер державної реєстрації в УкрНДІНТІ №0108U001367 та «Розроблення методики проектування систем управління для нафтогазової промисловості», номер державної реєстрації в УкрНДІНТІ №0109U003180, де автор була безпосереднім виконавцем розділу розробки методики виявлення місць витоків з трубопроводів на основі аналізу процесу поширення акустичних сигналів у середовищі транспортування трубопроводу.

Мета досліджень: забезпечення надійності експлуатації трубопроводів та попередження аварійних ситуацій за рахунок оперативного виявлення місця утворення витоків з використанням розробленого методу і системи контролю.

Завдання досліджень:

- проаналізувати сучасний стан проблеми контролю за появою витоків з трубопроводів;
- розробити теоретичні засади методу контролю витоків з трубопроводів на основі аналізу акустичних сигналів, що розповсюджуються в середовищі транспортування;
- розробити методичне, технічне і програмне забезпечення для проведення експериментальних досліджень характеру розповсюдження акустичних коливань;
- розробити метод і алгоритм контролю трубопроводів за наявністю витоків і несанкціонованих врізань;
- розробити апаратні та програмні засоби для реалізації методу виявлення місця витoku речовини з трубопроводу;
- провести апробацію розроблених методу і технічних засобів контролю за появою витоків з трубопроводів у польових умовах.

Об'єкт досліджень – процес розповсюдження акустичних коливань у середовищі заповнення трубопроводу при наявності витоків у стінках трубопроводу.

Предмет досліджень – методи і технічні засоби контролю витоків з трубопроводів.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених у роботі завдань використовувалися методи математичної фізики, чисельні методи математичного аналізу, основні положення технічної діагностики (віброакустичні методи), теорії планування експериментів, методи кореляційного аналізу та теорії розпізнавання образів. При розробці технічного забезпечення використовувались методи системо- і схемотехніки, а при розробці програмного забезпечення – методи об'єктно-орієнтованого програмування.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше встановлено взаємозв'язок між параметрами імпульсної характеристики трубопроводу та місцем появи витoku, який покладено в основу методу контролю технічного стану трубопроводу.
2. Вперше розроблено метод контролю за появою витоків з технологічних трубопроводів з використанням тестових акустичних коливань, генерованих на основі використання завадостійких кодів, що дозволило збільшити максимальну відстань виявлення місця витoku з трубопроводу.
3. Вперше розроблено структуру системи виявлення витоків, яка дозволяє автоматизувати процес визначення місця витоків на основі розробленого методу і

представити отримані результати в зручній для оператора формі.

4. Дістав подальший розвиток спосіб обробки вимірювальної інформації на основі кореляційних функцій із застосуванням адаптивних фільтрів, використання якого дало змогу підвищити чутливість розробленого методу контролю витоків.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробленні:

- методики проведення акустичного контролю витоків, яка дозволяє оперативно виявити місця витоків і, тим самим, зменшити матеріальні збитки та попередити забруднення довкілля;

- програмного забезпечення комп'ютерної системи контролю технічного стану трубопроводу на базі методів завадостійкого кодування, адаптивної фільтрації та кореляційного аналізу, яке дозволяє формувати тестові сигнали, обробляти і зберігати реєстровані акустичні сигнали та вести базу даних з результатами досліджень;

- системи виявлення місць витоків на основі персональної ЕОМ типу IBM PC, використання якої, в комплексі з розробленим програмним та технічним забезпеченням, дозволяє отримати оперативну інформацію про технічний стан трубопроводу в реальному масштабі часу.

Розроблені метод та система контролю витоків з трубопроводів пройшли апробацію в польових умовах на ділянках технологічного трубопроводу кафедри військової підготовки ІФНТУНГ та промислової апробацію на ГРС Долинського лінійного виробничого управління магістральних газопроводів УМГ "Прикарпаттрансгаз" (акт від 23.04.2010 р.) і прийняті до впровадження.

Результати теоретичних і експериментальних досліджень впроваджено в навчальному процесі – в робочих програмах дисциплін "Методи і засоби діагностування об'єктів нафтогазового комплексу", "Системи діагностування" та "Об'єкти і процеси управління нафтогазового комплексу" (акт від 09.07.2010 р.), які читаються для студентів спеціальності 7.091401 – "Системи управління і автоматизації".

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно [8, 13]. У співавторстві запропоновано новий підхід до виявлення місця утворення витоків з трубопроводів з використанням акустичних сигналів, які генеруються в середовищі заповнення трубопроводу [1, 9]; наведено математичне представлення вказаного процесу [10] та спосіб ідентифікації стану трубопроводу [2]; для проведення комплексу експериментальних досліджень розроблена структура стендової установки та експериментально одержано імпульсні характеристики трубопроводу для різного розміру та відстані розміщення витоків, наявних неоднорідностей трубопроводу на шляху поширення коливань [1, 2, 12, 14]; на основі результатів проведених експериментів розроблено новий метод виявлення місця витоків з трубопроводу [7, 11] і запропоновано шляхи його технічної реалізації [3, 15]; запропоновано алгоритм обробки відбитих від неоднорідностей

сигналів [4]; досліджено умови застосування методу [5]; апробовано розроблену систему контролю витоків на технологічному трубопроводі в польових умовах [6]. Одержано свідоцтво права інтелектуальної власності № 31553 на методику виявлення місць витоків із застосуванням розробленого методу.

Автор брала безпосередню участь у підготовці і проведенні лабораторних та польових досліджень і обробці експериментальних даних.

Апробація результатів досліджень. Результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на XXII, XXIII Міжнародних міжвузівських школах-семінарах "Методи і засоби технічної діагностики" (м. Івано-Франківськ, 2005 р., м. Йошкар-Ола (Росія), 2006 р.); XXIV (I), XXVI (II) Міжнародних міжвузівських школах-семінарах "Методи і засоби діагностики в техніці та соціумі" МіЗДТС-2007, МіЗДТС-2009 (м. Івано-Франківськ, 2007, 2009 р.); Всеукраїнській науково-практичній конференції "Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій в науці, освіті та економіці" (м. Луганськ, 2006 р.); 7-й Міжнародній промисловій конференції "Ефективність реалізації наукового, ресурсного і промислового потенціалу в сучасних умовах" (с. Славське, 2007 р.); Міжнародній науково-практичній інтернет-конференції "Сучасні напрямки теоретичних і прикладних досліджень'2007" (м. Одеса, 2007 р.); Міжнародній науково-технічній конференції "Ресурсозберігаючі технології в нафтогазовій енергетиці" "ІФНТУНГ-40" (м. Івано-Франківськ, 2007 р.); 5-й Міжнародній науково-практичній конференції "Комп'ютерні системи в автоматизації виробничих процесів" МНПК КСАВП-2007 (м. Хмельницький, 2007 р.); VI, VII Всеукраїнських науково-технічних конференціях "Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів" (м. Кременчук, 2007, 2008 р.); 4-й та 6-й Міжнародних молодіжних науково-технічних конференціях "Сучасні проблеми радіотехніки і телекомунікацій" РТ-2008, РТ-2010 (м. Севастополь, 2008, 2010 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Нафтогазова енергетика: проблеми та перспективи» (м. Івано-Франківськ, 2009 р.); 10-й Європейській конференції по неруйнівному контролю ЕКНДТ 2010 (м. Москва (Росія), 2010 р.); наукових семінарах кафедри комп'ютерних технологій в системах управління та автоматики (2004 - 2010 рр.).

Публікації. За результатами досліджень, які викладені в дисертації, опубліковано 15 робіт (з них 2 одноосібні), з яких 6 у виданнях, включених ВАК до переліку фахових видань України, 1 патент на винахід, 4 – тези доповідей на конференціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, викладених на 166 сторінках тексту, 77 рисунків, 20 таблиць, списку використаних джерел, який містить 106 найменувань, та додатків на 53 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У *вступі* обґрунтовано актуальність проблеми, показано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, визначено мету і завдання дослідження, сформульовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів.

У *першому розділі* аналізується сучасний стан проблеми контролю за витоками з трубопроводів, наведено класифікацію трубопроводів, основні причини їх відмов, класифікацію витоків, їх вплив на параметри режиму трубопроводу.

Наведено огляд підходів до моделювання газо- та нафтотранспортних систем та шляхів рішення обернених задач транспортування нафти і газу, до яких відносяться задачі визначення місць аварій на трубопроводах.

Виконано аналіз існуючих систем класифікації методів контролю витоків з трубопроводів за різними показниками: режимом роботи трубопроводу; періодичністю застосування; вимірюваними параметрами; фізичними явищами; принципом дії. Наведено характеристики найпоширеніших методів виявлення витоків, а також приклади їх практичного застосування в Україні та за кордоном.

Аналіз наведених методів і шляхів їх реалізації показав відсутність сьогодні загальноприйнятих методів, які б задовольняли вимогам, що висуваються до систем контролю за витоками (точність, оперативність локалізації, виявлення "малих" витоків (втрата $\leq 1\%$ від номінальної пропускної здатності трубопроводу), і т.д.). Перспективним напрямком розробки ефективних методів контролю за появою витоків є поєднання активних методів діагностування з віброакустичними.

На основі проведеного аналізу сформульовано мету та завдання дисертаційної роботи.

Другий розділ присвячений теоретичним дослідженням хвильових процесів при діагностуванні цілісності стінок трубопроводів.

За основу розроблюваного методу контролю за витоками з трубопроводів взято підхід, який ґрунтується на генеруванні і обробці відбитих хвиль в середовищі транспортування. Особливістю вказаного підходу є взаємодія безпосередньо з середовищем транспортування для виявлення технічного стану трубопроводу (наявність чи відсутність витоків), що зменшує вплив сторонніх завад при фіксуванні і обробці відбитих від неоднорідностей (різкі повороти, місця відведень, встановлення клапанів, витоків та інш.) сигналів.

Аналогія гідравлічних, електричних і акустичних коливних процесів, фізична суть яких пов'язана з перетворенням кінетичної і потенціальної енергій, що визначають фізичні властивості середовища і характер хвильових процесів у ньому, дозволяє використовувати математичний апарат (розвинутий в електротехніці) для одержання розв'язків системи диференційних рівнянь руху та балансу. В якості вихідної моделі процесу розповсюдження хвиль у трубі використовується система

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{\rho}{S} \frac{\partial v}{\partial t}, \\ -\frac{\partial v}{\partial x} &= \frac{S}{\rho c^2} \frac{\partial p}{\partial t}, \end{aligned} \quad (1)$$

де $\frac{\partial p}{\partial x}$ і $\frac{\partial p}{\partial t}$ – зміна тиску в трубопроводі в залежності від координати і часу відповідно; ρ – густина; v – лінійна швидкість; S – площа поперечного перерізу трубопроводу; c – швидкість звуку в середовищі.

Рівняння (1) справедливі за умови розповсюдження плоскої хвилі в напрямку поздовжньої осі труби, відсутності втрат на в'язкість і теплопровідність всередині потоку і на стінках труби. Застосування дискретизації по x до рішення рівняння (1) у вигляді співвідношень хвиль, які розповсюджуються в прямому і зворотному напрямках, дозволяє звести розгляд процесу поширення акустичного сигналу в трубопроводі до побудови сигнального графу та еквівалентної дискретної моделі. Запропоновано в якості діагностичної ознаки контролю стану трубопроводу використовувати параметри дискретної функції передачі (ДФП), яку подано у вигляді:

$$W(z) = \frac{0,5(1+r_G) \prod_{k=1}^N (1+r_k) z^{-N/2}}{D(z)}, \quad (2)$$

де r_G, r_k – коефіцієнт відбивання хвилі $u^-(t)$ (відбита хвиля) для границі трубопроводу та k -го з'єднання двох ділянок труби; $D(z)$ – поліном змінної z^{-1} , який у випадку $r_G = 1$ (акустичний опір на границі трубопроводу $Z_G = \infty$) обчислюється за рекурсивною формулою:

$$\begin{aligned} D_0(z) &= 1; \\ D_k(z) &= D_{k-1}(z) + r_k z^{-k} D_{k-1}(z^{-1}), \quad k = 1, 2, \dots, N; \\ D(z) &= D_N(z). \end{aligned} \quad (3)$$

Показано, що наявність отвору в стінці трубопроводу веде до появи додаткового впливу на процес розповсюдження хвиль у середовищі транспортування за рахунок акустичного опору отвору. В роботі наведено результати розрахунків величини модуля коефіцієнта відбивання від витоків $\varnothing 1-10$ мм для акустичних коливань з частотами 50-1000 Гц та для відгалужень з діаметром, який дорівнює діаметру трубопроводу. Одержані чисельні дані дозволили узагальнити наведену вище модель поширення коливань для випадку існування неднорідностей по довжині трубопроводу з врахуванням зміни акустичного опору (імпедансу) каналу передачі (рідина чи газ).

Розглянуто можливість застосування параметричної ідентифікації об'єкта

контролю з метою визначення коефіцієнтів ДФП. Одержані результати продемонстрували адекватність запропонованої моделі. Встановлено, що різниця у ступені відповідності вхідним даним побудованих емпіричних моделей AutoRegressive with eXternal input (ARX) та AutoRegressive-Moving Average with eXternal input (ARMAX) становить $\approx 1,5\%$, що дозволяє обмежитись використанням моделі ARX.

Показано, що врахування впливу виду тестового сигналу на процес розповсюдження хвиль у середовищі заповнення трубопроводу (далі за текстом “у трубопроводі”) дозволяє узгодити тривалість імпульсу і роздільну здатність по дальності, що дозволить збільшити дальність сканування трубопроводу та імовірність виявлення витоку. Оцінено ступінь відповідності вхідним даним побудованих ARX моделей з використанням в якості тестових сигналів відео-, радіоімпульсів, завадостійких сигналів (Баркера, ЛЧМ, М-последностей), який при дії тестового сигналу у вигляді 13-ти розрядного коду Баркера становить $69,66 - 92,12\%$ у залежності від наявності витоку і рівня шуму вимірювань. На основі проведених розрахунків запропоновано в якості тестових сигналів використовувати радіосигнали з несучою частотою, визначеною для відомого діаметру трубопроводу, що володіє низьким рівнем згасання, які модульовані за алгоритмом завадостійких сигналів (коди Баркера, М-последности).

Проаналізовано особливості оброблення відбитих сигналів. Для підвищення відношення сигнал/шум запропоновано проводити адаптивне фільтрування реєстрованих сигналів, обчислення взаємкореляційних функцій (ВКФ) тестового та реєстрованих сигналів і перетворення Гільберта, що дозволить зменшити ймовірність хибного виявлення місцевих неоднорідностей трубопроводу (в т.ч. витоків).

Встановлено, що використання уточненої величини швидкості розповсюдження акустичних хвиль у середовищі транспортування дозволяє знизити похибку визначення координати неоднорідності на 12% .

Для кількісної оцінки максимальної відстані виявлення витоку досліджено величину згасання акустичних коливань на відповідній частоті тестового сигналу, яка є визначальною для вибору параметрів генерованого сигналу і залежить від тиску, температури, вологості (для газу), лінійних розмірів трубопроводу. Результати розрахунків коефіцієнтів згасання акустичних коливань для речовин при нормальних умовах (температура $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, тиск $0,101325\text{ МПа}$) наведено в табл. 1. Подальші лабораторні дослідження було проведено з середовищем заповнення трубопроводу, яке має найбільше згасання на відповідній частоті тестового сигналу. Таким середовищем є повітря (табл. 1).

Проведено обґрунтування вибору частотного діапазону генерування тестових сигналів, які можуть розповсюджуватись на значні відстані в трубопроводі. Встановлено, що критичне значення частоти, нижче за яку в трубопроводі розповсюджуються тільки плоскі хвилі (мода $0,0$), для

Таблиця 1. Коефіцієнти згасання акустичних коливань у газах та рідинах у залежності від несучої частоти сигналу, дБ/км

Коефіцієнт згасання, дБ/км			
Середовище розповсюдження	Частота коливань, Гц		
	50	500	1000
Газ			
повітря	16,37	51,73	73,24
метан	12,84	40,62	57,49
аміак	12,14	38,4	54,36
Рідини			
вода	0,98	3,11	4,39
бензин	1,09	3,44	4,87
дизельне пальне	2,56	8,09	11,44

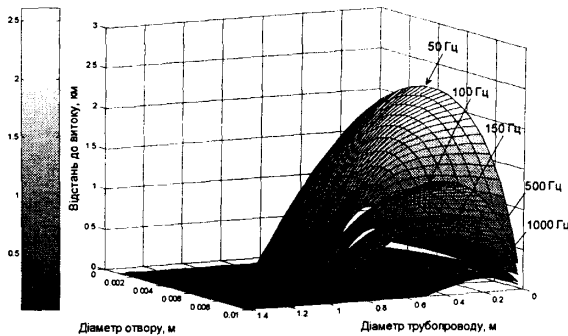


Рис. 1. Максимальна відстань виявлення витоків \varnothing 1-10 мм для трубопроводів \varnothing 0,05-1,4 м

трубопроводу \varnothing 150 мм становить $\approx 2,7$ кГц і зменшується до ≈ 1 кГц при збільшенні діаметру трубопроводу до 1,4 м.

З врахуванням спаду амплітуди на витокі та коефіцієнта згасання одержано залежності несучої частоти сигналу від діаметра трубопроводу, діаметра витокі та відстані його розміщення від місця генерування тестового сигналу.

Як видно з рис. 1 максимальна відстань виявлення витоків $\approx 2,5$ км досягається для повітря при використанні несучої частоти 50 Гц для діаметру трубопроводу 0,6 м при виявленні витокі \varnothing 10 мм. Для діаметру витокі 1 мм максимальна дальність виявлення на тій же частоті становить 0,7 км для діаметра трубопроводу 0,15 м.

Третій розділ присвячений лабораторним дослідженням хвильових процесів у трубопроводі і розробці нового методу виявлення місця витокі, який заснований на аналізі імпульсних характеристик трубопроводу.

Визначено, що для виявлення витокі, які відносяться до “малих” (об’єм втрати не перевищує 1% від пропускної здатності трубопроводу), діаметр отвору в стінці трубопроводу при проведенні моделювання в залежності від режимних параметрів та діаметра трубопроводу повинен становити 2-10 мм.

Для перевірки результатів розрахунків за теоретичною моделлю і у зв’язку з складністю динамічного процесу (розповсюдження імпульсів у середовищі, обмеженому стінками трубопроводу) було розроблено експериментальний лабораторний стенд, до складу якого входить трубопровід \varnothing 50 мм довжиною 24 м, вставки аналогічного діаметра з отворами \varnothing 4-8 мм, з’єднувальні елементи для встановлення вставки на необхідній відстані по довжині трубопроводу,

нагнітач.

Для проведення лабораторних експериментів розроблена методика проведення досліджень, здійснено підбір технічних засобів. Генерування та реєстрування сигналів проводилось з використанням комп'ютера із 24-розрядною звуковою картою з частотою дискретизації 192 кГц. Електроакустичний перетворювач для випромінювання звуку в повітряному середовищі (звуковідтворювальна електродинамічна головка HD 240) здійснював генерування тестових сигналів. Реєстрування проводилось перетворювачем сигналів типу МКЭ-3.

Експерименти проведено з використанням програмних продуктів RightMark Audio Analyzer 6.1.2 і Media Production System Steinberg Nuendo 3, що дозволяють провести тестування повного кола звукової карти та генерування/реєстрування звукових сигналів відповідно. Дане програмне забезпечення дозволяє накопичити базу даних проведених експериментів.

З використанням лабораторного стенду досліджено розповсюдження акустичних коливань різної амплітуди, тривалості, несучої частоти і виду модуляції, з витоком та без нього.

Оброблення експериментальних даних проводилось у середовищі MatLab 7.

На рис. 2 наведено зареєстровані імпульсні характеристики трубопроводу для наступних випадків: трубопровід зі стінками без дефектів (а), наявний наскрізний витік (б).

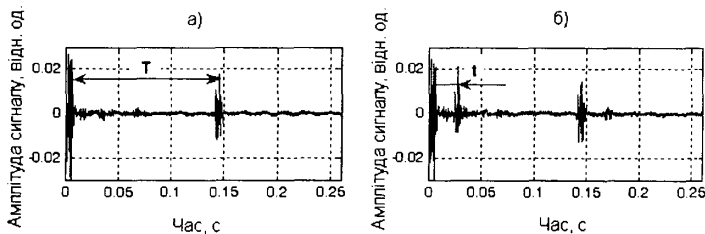


Рис. 2. Реакція системи на імпульсну вхідну дію: а) однорідні стінки; б) наявний наскрізний витік (місцева неоднорідність стінки)

Для збільшення роздільної здатності при виявленні витоку проведено серію експериментів з використанням завадостійких кодів – Баркера та ЛЧМ-сигналів. Приклад зареєстрованого сигналу, генерованого у вигляді коду Баркера розрядності 13 для випадку фазової маніпуляції з несучою частотою 500 Гц та відповідна ВКФ тестового і записаного сигналів наведено на рис. 3, цифрами 1 та 2 (б) позначено локальні максимуми ВКФ, за якими визначається позиція відгуку 1 та 2 з (а). Одержане значення відношення максимуму 1 ВКФ до бокових пелюстків становить ≈ 12 . Показано, що розширення частотного діапазону генерування ЛЧМ-сигналу веде до зменшення амплітуди реєстрованого сигналу, що узгоджується з теоретично визначеним граничним значенням частоти, яке

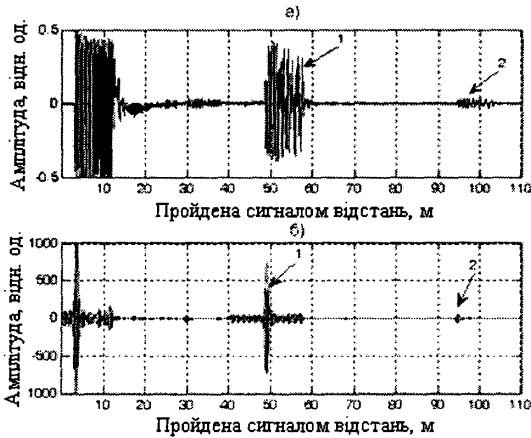


Рис. 3. Зареєстрований 13-ти розрядний сигнал Баркера тривалістю 0,026 с з несучою частотою 500 Гц, сформований на основі фазової маніпуляції: а) амплітуда; б) ВКФ

наявність неоднорідностей стінок по довжині трубопроводу суттєво змінює вигляд його імпульсної характеристики, що дозволяє за локальними максимумами взаємкореляційної функції реєстрованого та тестового сигналів визначати відстані до місця їх розміщення.

Експериментальні дані оцінки спаду амплітуди сигналу на витоку відповідного діаметру представлено в табл. 2.

Таблиця 2. Експериментально одержані дані про параметри реєстрованих сигналів-відгуків від неоднорідностей в модельному трубопроводі

Діаметр витоку, мм	Амплітуда, відн. од.		Різниця між відбитим від витоку сигналом і реєстрованим, дБ	Спад амплітуди на витоку, дБ	Величина модуля коефіцієнта відбивання по амплітуді	
	Реєстрований сигнал	Відбитий від витоку на відстані 8 м			експериментальна	теоретична
Несуча частота сигналу 600 Гц						
4	0,07701	0,00357	-26,678	-23,958	0,063	0,066
5	0,0769	0,00449	-24,674	-21,954	0,08	0,09
6	0,07681	0,00599	-22,16	-19,44	0,107	0,114
8	0,07403	0,00657	-21,037	-18,317	0,121	0,162
Несуча частота сигналу 100 Гц						
4	0,01384	0,00373	-11,389	-10,173	0,31	0,37
5	0,01294	0,00531	-7,737	-6,521	0,472	0,475
6	0,01319	0,00587	-7,033	-5,817	0,512	0,566
8	0,01629	0,00842	-5,732	-4,516	0,595	0,703

визначає характер поширення коливань для відповідного діаметру трубопроводу.

Проведено експериментальне визначення коефіцієнта згасання при поширенні тестового сигналу в трубопроводі за відсутності неоднорідностей стінок. Встановлено залежність між енергетичними характеристиками тестових сигналів та амплітудою ВКФ реєстрованого та тестового сигналів.

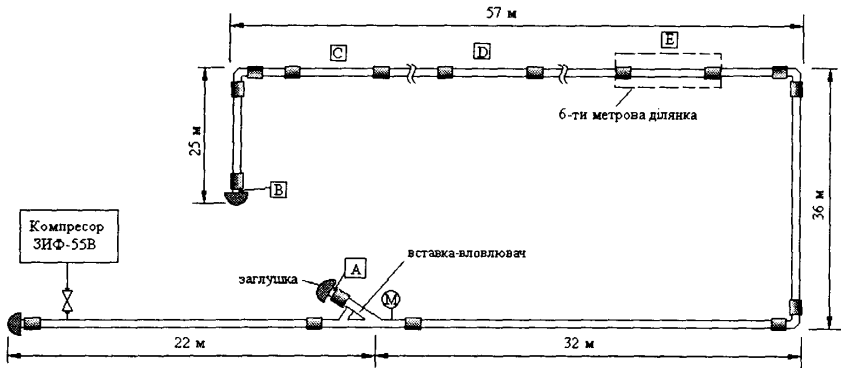
Досліджено вплив довжини відгалуження трубопроводу на вигляд імпульсної характеристики. Показано, що

Як видно з табл. 2, теоретична і експериментальна оцінка модуля коефіцієнта відбивання по тиску для витоків різного діаметру узгоджені між собою. Занижені експериментальні значення зумовлені поглинанням звуку матеріалом стінок трубопроводу.

Показано, що найвища вірогідність виявлення витоків досягається при застосуванні завадостійких тестових сигналів і адаптивної фільтрації сигналів, яка дозволяє підвищити відношення сигнал/шум до ≈ 10 дБ.

Результати проведених лабораторних досліджень дозволили запропонувати алгоритм виявлення витоків з трубопроводів, який може бути адаптований для різного діаметру та матеріалу виготовлення стінок трубопроводів і середовища транспортування.

Розроблено порядок проведення експериментів на трубопроводному полігоні польового магістрального трубопроводу (рис. 4) кафедри військової підготовки (ВП), що дозволило провести апробацію розробленого методу контролю за появою витоків в польових умовах.



А, В – точки підключення вставки для генерування та реєстрації імпульсів; М – манометр; С, D та Е – ділянки, які підлягають заміні на ділянку з вмонтованим імітатором витоків

Рис. 4. Схематичне зображення трубопроводу $\varnothing 150$ мм, розгорнутого на полігоні кафедри військової підготовки ІФНТУНГ

Спроектовано інформаційно-вимірювальну систему з розробленням принципів схем окремих її вузлів для проведення експериментальних досліджень у польових умовах. Проведено метрологічний аналіз розробленої системи контролю, який показав, що сумарна приведена похибка системи становить 3,84%. Для підвищення точності визначення швидкості поширення звукових коливань у трубопроводі до складу системи введено додатковий давач акустичних коливань. Витік імітували відкриванням крану-імітатору витоків, вмонтованому на ділянці трубопроводу.

У четвертому розділі на основі проведених теоретико-експериментальних досліджень проведено розроблення системи виявлення місць витоків. На спосіб визначення місця витoku речовини з трубопроводу та систему для його здійснення одержано патент [7].

Проведена розробка структурної схеми системи контролю за появою витоків (рис. 5), а також програмного забезпечення системи.

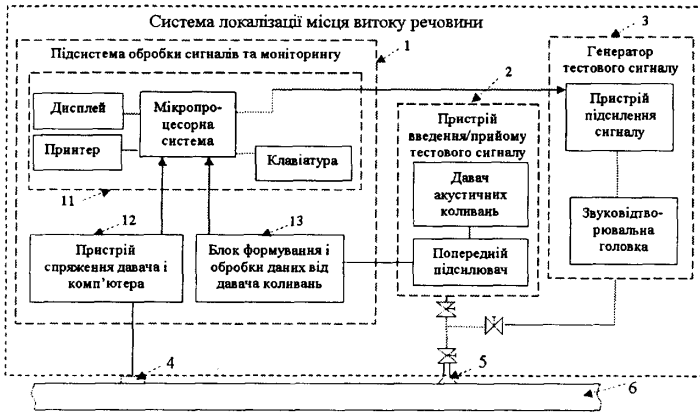


Рис. 5. Структурна схема системи виявлення витоків на трубопроводах

1 – підсистема обробки сигналів та моніторингу

2 – пристрій введення/прийому тестового сигналу

3 – генератор тестового сигналу

4 – ультразвуковий давач вимірювання густини середовища

транспортування

5 – відвід трубопроводу для створення тестових сигналів в середовищі транспортування трубопроводу

6 – трубопровід

Підсистема обробки сигналів та моніторингу складається з комп'ютера (11), пристрою спряження (12) та блоку формування і обробки даних від пристрою введення/прийому тестового сигналу (13).

Підсистема обробки сигналів та моніторингу працює наступним чином. Електричні сигнали з давача акустичних коливань, що входить до пристрою введення/прийому тестового сигналу, перетворюються в блоці формування і обробки даних у цифровий код і надходять до комп'ютера, де вони обробляються і аналізуються. Робочий алгоритм мікропроцесорної системи забезпечує генерування тестового сигналу, обробку прийнятих сигналів та вивід результатів обробки у візуальній формі, зручній для сприйняття людиною-оператором. Тестовий сигнал, який надходить у трубопровід, модулюється заводозахищеним

кодом. Визначення відстані до витоку проводиться за часом, що встановлюється з взаємкореляційної функції тестового сигналу і сигналу-відгуку. Підсистема обробки сигналів та моніторингу, окрім розпізнавання сигналу наявності витоку в трубопроводі, контролює процес створення тестового сигналу в генераторі 3. Такий тестовий сигнал розповсюджується в трубопроводі і відбивається від неоднорідностей стінок трубопроводу 6. Відбиті хвилі сприймаються пристроєм введення/прийому тестового сигналу.

Визначення відстані до витоку L проводиться на основі залежності

$$L = c \cdot \Delta T / 2 \quad (4)$$

з використанням визначеної величини ΔT (різниця між часом пуску тестового сигналу і часом прийому відбитої хвилі) та швидкості розповсюдження хвиль c в середовищі транспортування.

Процедура визначення координати витоку наступна: прийняті вторинні відбиті хвилі, після обробки за допомогою алгоритму обчислення ВКФ, формують імпульсну характеристику трубопроводу, яка дозволяє виявити всі значні його неоднорідності. Процедура виявлення витоку проводиться на основі порівняння імпульсних характеристик трубопроводу в двох станах – за відсутності витоку і при його появі.

Розроблене програмне забезпечення для ПЕОМ мовою Delphi системи контролю за появою витоків реалізує простий процес управління генеруванням тестових сигналів, збором і обробкою даних, веденням бази даних з результатами досліджень та інтерфейс користувача. Функціонально воно дозволяє здійснювати розрахунок граничних значень частот тестового сигналу, величини коефіцієнта згасання звукових коливань, проводити генерування тестового сигналу на основі алгоритму формування завадостійких кодів з обраним значенням несучої частоти; виводити сформований тестовий сигнал на вихід звукової карти (Out); проводити реєстрацію відбитих від неоднорідностей в трубопровідній системі сигналів; відображати записані акустичні сигнали; проводити фільтрування сигналів за алгоритмом адаптивної фільтрації методами LMS (Least Mean Square) і RLS (Recursive Least Square), оброблення реєстрованих сигналів за алгоритмом розрахунку взаємкореляційної функції, перетворення Гільберта; здійснювати формування різницевих характеристик та пошук локальних екстремумів.

Результати апробації розробленого методу та системи виявлення місць витоків на трубопроводі кафедри військової підготовки ІФНТУНГ демонструють ефективність у визначенні місця витоку. Було проведено серію експериментів при різних позиціях ділянки трубопроводу з імітатором витоку та величиною надлишкового тиску газового середовища в трубопроводі. Для кожного випадку визначено швидкість поширення звукових коливань на основі даних двох давачів акустичних коливань та відомою відстанню їх встановлення, що дозволило зменшити похибку визначення координати витоку.

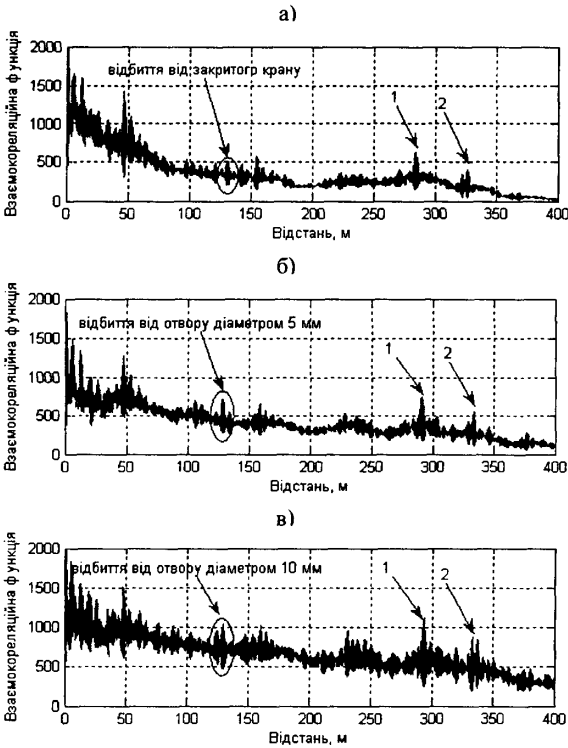


Рис. 6. Взаємкореляційні функції реєстрованих сигналів двома мікрофонами для випадків: кран закритий (а), відкритий кран з насадкою для витоку \varnothing 5 мм (б) та \varnothing 10 мм (в)

Результати визначення координати витоків представлено в табл. 3 та графічно на рис. 7. Локальні максимуми (рис. 7, а) характеризують місцеві неоднорідності трубопроводу, що відповідає схемі його прокладання.

Таблиця 3. Результати експериментів з визначення координати витоку

Діаметр витоку, мм	Амплітуда сигналу, відн. од.	Визначена координата витоку, м	Абсолютна похибка, м
1	0,451695	63,62	0,38
3	0,637372	64,26	0,26
5	0,52204	64,64	0,64

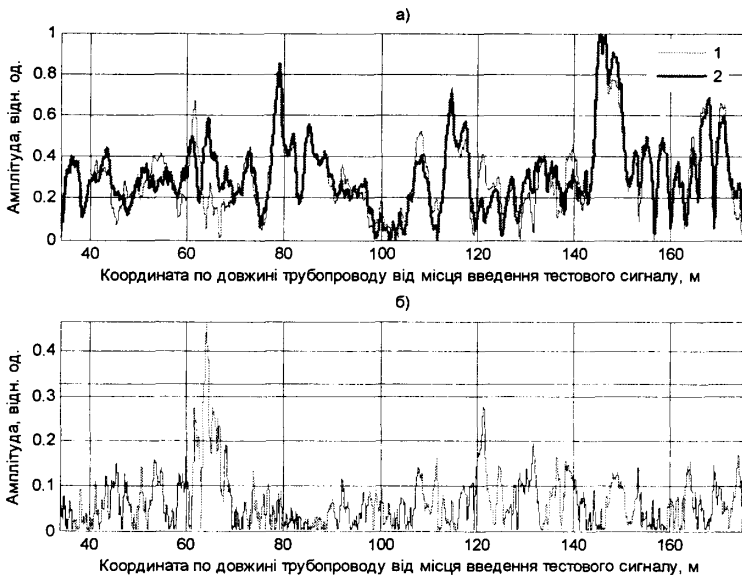
На підставі одержаних даних розроблено методику проведення акустичного контролю витоків.

Результати співставлення загальної кількості витоків при проведенні серії експериментів з фактично виявленими із застосуванням наведеного алгоритму

Взаємкореляційні функції реєстрованих сигналів із тестовими для випадків закритого крану-імітатора витоку та для випадку встановлення насадки для імітації витоку \varnothing 5 та 10 мм представлено на рис. 6. Позначення на рис. 6: 1 – місце розміщення вставки-влловлювача; 2 – місце розміщення відводу для нагнітання тиску в трубопроводі.

Згідно розробленого алгоритму безпосереднє визначення координати наскрізного отвору проводиться після застосування адаптивного фільтрування до реєстрованих сигналів, обчислення ВКФ, перетворення Гільберта, нормування та побудови різничевої імпульсної характеристики. Результати

контролю витоків показали, що ймовірність контролю складає 0,94.



1 – відсутній витік; 2 – витік \varnothing 1 мм

Рис. 7. Модуль перетворення Гільберта для ВКФ тестового і реєстрованого давачем акустичних коливань сигналів (а) та їх різниці (б)

Встановлено, що розподіл випадкової похибки результатів вимірювання відстані до витоків – нормальний, абсолютна похибка одичного результату вимірювань відстані до витоків становить $\pm 0,8$ м з довірчою ймовірністю 0,98.

Польові дослідження показали працездатність пропонованого методу виявлення витоків та його технічної реалізації.

Проведена промислова апробація розробленого методу та системи контролю витоків з трубопроводів на ГРС Долинського ЛВУМГ УМГ "Прикарпаттрансгаз", результати якої підтвердили їх ефективність.

ВИСНОВКИ

У результаті проведених теоретичних, експериментальних та польових досліджень вирішена важлива науково-технічна проблема – розроблено метод виявлення місця витоків речовини з трубопроводу та систему для його реалізації і одержано такі основні результати:

1. На основі проведеного аналізу відомих методів і засобів контролю появи витоків на трубопроводах встановлено, що їх використання не забезпечує необхідної вірогідності та оперативності виявлення місця витоків і обмежено

параметрами трубопроводу, профілем траси, властивостями речовини, яка транспортується, а незначна кількість вітчизняних розробок у цьому напрямі визначає актуальність поставлених у роботі завдань.

2. Запропонована в роботі математична модель поширення акустичних коливань у середовищі заповнення трубопроводу, яка стала основою для розробки нового методу виявлення місць витоків і несанкціонованих відборів, враховує наявні місцеві неоднорідності стінок трубопроводу.

3. Обґрунтовано використання завадостійких сигналів на прикладі коду Баркера як тестових, що дозволяє збільшити дальність та імовірність виявлення витoku та провести узгодження тривалості сигналу і його роздільної здатності.

4. Проведені дослідження на розробленому експериментальному лабораторному стенді та в польових умовах підтвердили, що інформативним параметром появи витoku є зміна амплітуди локальних максимумів імпульсної характеристики трубопроводу. Отримано залежності амплітуди локальних максимумів імпульсної характеристики трубопроводу від параметрів тестового сигналу (амплітуди, тривалості, способу формування) та діаметру витoku.

5. Розроблено новий метод виявлення місця витoku з використанням тестових акустичних коливань, які створені в середовищі транспортування трубопроводу (патент 83290 України), який дозволяє виявити витік з отвору в стінці трубопроводу та визначити відстань до нього шляхом порівняння імпульсних характеристик трубопроводу в базовому та поточному станах.

6. Створено модель системи виявлення місць витоків з технологічних трубопроводів, яка в комплексі з розробленим програмним забезпеченням дозволяє автоматизувати процес контролю за появою витоків. Похибка вимірювання відстані до витoku з довірчою ймовірністю 0,98 становить $\pm 0,8$ м.

7. Проведена промислова апробація розробленого методу та системи контролю витоків з трубопроводів на ГРС Долинського ЛВУМГ УМГ "Прикарпаттрансгаз", результати якої підтвердили їх ефективність. За попередніми оцінками, ймовірність контролю становить 0,94.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Захіовський Л. М., Штаєр Л. О. Контроль стану трубопроводу з використанням імпульсних характеристик // Восточно-Европейский журнал передових технологій. – Харків, 2006. – № 4/1 (22). – С. 18-19.

2. Захіовський Л. М., Штаєр Л. О. Діагностування несанкціонованого доступу до трубопроводів на основі параметричної ідентифікації // Вісник Східноукраїнського університету імені Володимира Даля. – Луганськ, 2007. - Ч.2, №4(110). – С. 57-62.

3. Захіовський Л. М., Ровінський В. А., Штаєр Л. О. Автоматизована система виявлення витоків в промислових трубопроводах // Вісник

- Хмельницького національного університету. – Хмельницький, 2007. - Т.1(93), № 3. – С. 179-181.
4. Заміховський Л. М., Ровінський В. А., Штаєр Л. О. Виділення сигналів на фоні завод в системі виявлення витоків з технологічних трубопроводів // «Наукові вісті» Галицької Академії. – Івано-Франківськ, 2008. – № 2(14). – С. 4-8.
5. Заміховський Л. М., Штаєр Л. О. Дослідження впливу неоднорідностей стінок трубопроводу на інформативність діагностичних сигналів в його середовищі // «Наукові вісті» Галицької Академії. – Івано-Франківськ, 2009. – № 15(1). – С.21-28.
6. Заміховський Л. М., Штаєр Л. О., Ровінський В. А. Експериментальне визначення місць витoku повітря на технологічному трубопроводі //Методи та прилади контролю якості. – Івано-Франківськ, 2010. - № 24. – С.73-77.
7. Пат. 83290 Україна, МПК G 01 N 29/04, G 01 M 3/24. Спосіб локалізації місця витoku речовини з трубопроводу та система для його здійснення / Заміховський Л. М., Ровінський В. А., Штаєр Л. О.; заявник і патентовласник науково-виробнича фірма «Еквідко». - № а200610331; заявл. 28.09.06; опубл. 25.06.2008, Бюл. № 12.
8. Штаєр Л. О. Сучасний стан діагностування несанкціонованого доступу до технологічних газопроводів // «Наукові вісті» Інституту менеджменту та економіки «Галицька академія». – 2005. – №2(8). – С. 68–78.
9. Заміховський Л. М., Штаєр Л. О. Моделирование процесса распространения звуковых волн в трубопроводах с нарушением сплошности стенок // Методы и средства технической диагностики: XXIII международная межвузовская школа-семинар, 28 июня-5 июля 2006 г. : сборник научных статей, вып. XXIII. – Йошкар-Ола, 2006. – С. 158-165.
- 10.Заміховський Л. М., Штаєр Л. О. Математичне представлення процесу розповсюдження хвиль у трубопровідній системі // «Наукові вісті» Інституту менеджменту та економіки «Галицька академія». – Івано-Франківськ, 2006. – № 2(10). – С. 3-8.
- 11.Заміховський Л. М., Штаєр Л. О. Метод виявлення витоків з трубопроводу при односторонньому доступі до середовища транспортування // Нафтогазова енергетика. - Івано-Франківськ, 2007. - № 2(3). – С. 59-62.
- 12.Заміховський Л. М., Штаєр Л. О. Дистанційне виявлення витоків продукту, що транспортується, з трубопроводу // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях: седьмая ежегодная международная промышленная конференция, 12-16 февраля 2007 г. : тезисы докл. - п. Славское, 2007. - С. 382-384.
- 13.Shtayer L. O. Pipeline leak detection and location using pressure wave propagation // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ-2008»: 4-та Міжнар. молодіжна наук.-техн. конф., 21-25 квітня 2008 р. : тези доповідей. – Севастополь, 2008. – С. 194.

14. Заміховський Л. М., Ровінський В. А., Штаєр Л. О. Експериментальне дослідження розповсюдження коливань в трубопроводній системі з метою виявлення місцевих неоднорідностей // Фізичні процеси та поля технічних і біологічних об'єктів: VII Всеукраїнська науково-технічна конференція, 7–9 листопада 2008 р. : тези доповідей. - Кременчук, 2008. – С. 63-64.

15. Shtayer L. O., Mosoryuk T. V. Theoretical and experimental basis of test signal parameter decision in the leak detection and location system // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ-2010»: 6-та Міжнар. молодіжна наук.-техн. конф., 19-24 квітня 2010 р. : тези доповідей. – Севастополь, 2010. – С. 248.

АНОТАЦІЯ

Штаєр Л.О. Акустичний метод та система контролю витоків з трубопроводів. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – Прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, 2010.

Робота присвячена вирішенню проблеми пошуку та визначення місць витоків з трубопроводів для забезпечення надійності експлуатації трубопроводів та попередження аварійних ситуацій за рахунок оперативного виявлення місць утворення витоків.

Показано, що максимальна ефективність у контролі появи витоків в трубопроводах досягається шляхом застосування дистанційних методів контролю стану трубопроводів. Для вирішення поставленого завдання було обрано акустичний метод контролю технічного стану трубопроводу.

Розроблено математичну модель процесу розповсюдження акустичних коливань у середовищі транспортування трубопроводу, яка враховує вплив появи витоків на характер поширення коливань. Розроблено метод автоматизованого контролю технічного стану трубопроводу та виявлення місць витоків з використанням завадостійких сигналів.

На основі проведених теоретико-експериментальних досліджень здійснена розробка системи виявлення місць витоків з трубопроводів. Проведена розробка функціональної схеми системи контролю, а також програмного забезпечення для реалізації запропонованого методу контролю трубопроводів.

Ключові слова: технічний стан, трубопровід, витік, акустичний метод контролю, система контролю.

АННОТАЦИЯ

Штаер Л.Е. Акустический метод и система контроля утечек из трубопроводов. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 - Приборы и методы контроля и определения состава веществ. - Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа, г. Ивано-Франковск, 2010.

Работа посвящена решению проблемы поиска и определения мест утечек из трубопроводов для обеспечения надежности эксплуатации трубопроводов и предупреждения аварийных ситуаций за счет оперативного выявления мест образования утечек. Важность поставленной задачи определяется тем, что размер потерь транспортированного сырья вследствие наличия утечек на трубопроводах определяется временем их обнаружения и точностью возможной координаты отбора. Оперативное выявление утечек на трубопроводах ведет к сокращению экономических и экологических ущербов.

Проведенный анализ современных методов и средств контроля утечек на трубопроводах показал ограничения в их применении. Показано, что максимальная эффективность в контроле появления утечек на трубопроводах достигается путем применения дистанционных методов контроля состояния трубопроводов. Для решения поставленного задания был избран акустический метод контроля технического состояния трубопровода, который предусматривает создание тестовых воздействий и регистрацию их в пределах транспортируемой трубопроводом среды.

Разработана математическая модель процесса распространения акустических колебаний в среде транспортирования трубопровода, которая учитывает влияние появления утечек на характер распространения колебаний. Обоснованность использования предложенной модели подтверждено проведенной процедурой параметрической идентификации для участка трубопровода с наличием и отсутствием утечек.

Разработано методическое, техническое и программное обеспечение метода контроля технического состояния трубопровода для проведения комплекса экспериментальных исследований по обнаружению и определению мест утечек с целью установления закономерностей изменения параметров колебательных процессов при отражении их от неоднородностей (резких поворотов, ответвлений, отверстий в стенке трубопровода, мест установки кранов и т.д.).

Анализ результатов экспериментальных исследований процесса распространения тестовых сигналов в транспортируемой среде трубопровода позволил определить параметры тестовых сигналов, которые обладают наименьшей степенью затухания для определенных условий распространения. Изменение характера распространения тестового сигнала при наличии и отсутствии утечек стало основой для разработки метода автоматизированного

контроля технического состояния трубопровода и выявления мест утечек с использованием в качестве тестовых помехоустойчивые сигналы, в частности коды Баркера. Использование такого рода сигналов в качестве тестовых с применением аппарату корреляционной обработки регистрируемых сигналов позволило повысить отношение сигнал/шум и увеличить расстояние обнаружения утечек. Было принято решение в качестве диагностического признака наличия утечки использовать разностную характеристику, полученную при распространении тестового сигнала в среде транспортирования трубопровода в базовом и текущем состоянии. При определении базовой характеристики принимается гипотеза про отсутствие утечек.

С учетом проведенных теоретических и экспериментальных исследований осуществлена разработка системы выявления мест утечек из трубопроводов. Погрешность измерения расстояния к утечке с доверительной вероятностью 0,98 составляет $\pm 0,8$ м. Разработано программное обеспечение для реализации предложенного метода контроля. Проведены исследования разработанных метода и системы контроля утечек в лабораторных и полевых условиях, подтвердившие работоспособность предложенного метода и технической реализации.

Ключевые слова: техническое состояние, трубопровод, утечка, акустический метод контроля, система контроля.

ABSTRACT

Shtayer L.O. Acoustic method and system of pipelines leaks control. - Manuscript.

The thesis for obtaining the scientific degree of Candidate of Technical Sciences by speciality 05.11.13 – "Devices and Methods of Control and Defining of Matter Composition". – Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil And Gas, Ivano-Frankivsk, 2010.

The work is devoted to decision of pipeline leak search and localization problem for pipeline operation reliability control and emergency situation prevention due to the real-time leak localization. It is shown that the maximal efficiency in pipeline leak appearance control is reached with the use of remote pipeline state control. For the task decision acoustic control method of pipeline technical state was selected.

The mathematical model of acoustic wave's distribution process in pipeline transporting fluid is developed, which takes into account influence of leak appearance on wave distribution pattern. The pipeline technical state automatic control and leak localization method is developed with the use of robust signals.

The pipeline leak localization system is developed on the basis of the conducted theoretical and experimental researches. The system control functional scheme is developed. And also software for offered pipeline control method realization is given.

Keywords: technical state, pipeline, leak, acoustic method of control, control system.