

УДК 620.197.6

DOI: 10.31471/2304-7399-2018-2(46)-161-169

## ДИСТАНЦІЙНИЙ КОНТРОЛЬ ГЕРМЕТИЧНОСТІ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ

**Р. Т. Мартинюк**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;  
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. 72-71-38;  
e-mail: snp@nupq.edu.ua*

*Відомо, що в процесі експлуатації магістральних газопроводів виникають порушення герметичності, які проявляються у вигляді витікань газу в навколишнє, створюючи загрозу забруднення навколишнього середовища і є потенційно небезпечними для виникнення відказів системи. На поверхні ґрунту такі витікання мають прояви як температурні аномалії на природному температурному фоні та аномалії концентрацій вуглеводнів. На відміну від аномалій іншого походження, у зоні витікання вони практично не залежать від просторових координат і часу.*

**Ключові слова:** *порушення герметичності, температурні аномалії, координати.*

Порушення герметичності газопроводів та витікання газу стали підґрунтям для розвитку різних методів виявлення ділянок порушення герметичності магістральних газопроводів. Дослідження провадилися у трьох напрямках: вимірювання радіаційних температур, вимірювання концентрацій метану в приповерхневому шарі повітря та комплексне вивчення поля концентрацій і температур.

Незважаючи на певні успіхи у створенні методики й техніки вимірювань, пропонувані методи мали деякі невизначеності. Так, наприклад, у працях багатьох авторів відсутні були відомості про те, які мінімальні витікання газу можна виявити пропонованим способом і чим це підтверджується. У випадку дослідження теплового поля поверхні Землі не вказувалося, як виокремлюється корисний сигнал із різноманітності завад, що нерідко перевищують його за амплітудою. Аналогічні питання виникали під час дослідження поля концентрацій метану в приземному шарі повітря. Теоретичні розрахунки положення газової хмари в залежності від напрямку вітру і характеру місцевості не мали практичного підтвердження через недосконалість математичної моделі та її неадекватність реальним умовам.

Враховуючи, що наявність аномалій температур чи концентрацій метану не є прямим свідченням місцезнаходження витікання газу то і не передбачено будь-яких методичних прийомів для ідентифікації виті-

кань і визначення їх точного місця розташування. Те ж саме можна сказати і про координатну прив'язку аномальних ділянок магістральних газопроводів.

П. Г. Філіпповим розроблено вертолітний лазерно-тепловізійний комплекс для контролю лінійної частини магістральних газо- і продуктопроводів, принцип дії якого базується на спільному використанні двох методів дистанційної діагностики: пасивного – тепловізійного та активного – лазерного методу диференціального поглинання з відбиттям випромінювання від підстильної земної поверхні. Автором зроблено наголос на розробці сканувального лазерного газоаналізатора, в якому використовується імпульсно-періодичний режим роботи, від чого потужність лазерного випромінювання зросла у  $10^5$  разів. Це дало можливість збільшити оптимальну висоту польоту вертольота для різних підстильних поверхонь (сніг, зораний ґрунт, водна поверхня) від 150 до 1000 м.

У праці [1] детально вивчено процес формування поля температур і концентрацій метану над діючим газопроводом за наявності й відсутності витікання газу та розроблено технологію дистанційного виявлення витікань газу на лінійній частині магістральних газопроводів.

Для розв'язання поставленої задачі було використано методи фізичного й математичного моделювання. На спеціально створеному полігоні досліджувався характер розподілу температур і концентрацій вуглеводнів у зоні витікання газу з дебітами 70; 150; 200; 225; 300; 350; 385; 500; 2000 і 4000 м<sup>3</sup>/добу з різних ділянок поверхні труби діючого газопроводу діаметром 1020 мм й у різні пори року. Вимірювання температур здійснено на рівні 1,5; 0,5; 0,2; 0,05 м і на поверхні Землі.

У результаті було встановлено час, за який порушення теплового поля досягає поверхні Землі для різних середовищ. Так, для витікання з дебітом 70 м<sup>3</sup>/добу це становить 5 діб, а з дебітом 4000 м<sup>3</sup>/добу – 16 год. Встановлено також геометричні розміри температурної аномалії, її амплітуду й співвідношення з фоновими ділянками.

Газометричні вимірювання показали, що при витіканнях близько 70 м<sup>3</sup>/добу вміст метану у ґрунтовому газі досягає 70 % об'єму, при 350 м<sup>3</sup>/добу – 79 %, при 500 м<sup>3</sup>/добу – від 83 до 87 % об'єму. У той же час, за межами дії витікання вміст метану не перевищував  $3,2 \cdot 10^4$  % об'єму.

У приземному шарі повітря малі витікання газу становили від 70 до 350 м<sup>3</sup>/добу, створюють концентрацію метану до 0,2 % об'єму.

На висоті 1 м від поверхні Землі насиченість атмосферного повітря вуглеводнями (через витікання) коливається у межах від 0,01 до 0,09 % об'єму. Цей рівень концентрацій спостерігається у приземному шарі повітря в радіусі 12 м від місця витікання.

При моделюванні витікань газу здійснювалися заміри температури ґрунту на різних рівнях (1,5; 0,5; 0,2; 0,05 м) на дослідному полігоні по спеціально встановлених профілях і на фоновому майданчику, пано-

рамна зйомка температурного поля й газометрична зйомка у ґрунті та на приповерхневому шарі атмосфери.

При переході від одного об'єму витікання до іншого провадилося вистоювання, під час якого температура ґрунту відновлювалася до температури ділянки (контрольної), розташованої на відстані 15 м від місця витікання.

На глибинах 1,5; 0,5 і 0,2 м від поверхні ґрунту заміри температури виконувалися термоелектронними давачами, розробленими в УкрНДІгазі, а на глибині 0,05 м – ртутними термометрами марки ТЛ-4.

На початку експерименту вимірювання температури під час моделювання витікання газу здійснювали 6 разів на добу (кожні 4 години), а у режимі відстою – двічі на добу (об 9 та 19-й год.). При наступних випусканнях газу температуру ґрунту вимірювали тричі на добу – до сходу сонця, у середині дня й після заходу сонця.

Перше випускання газу (витрата  $70 \text{ м}^3/\text{добу}$ ) з нижньої поверхні труби показало, що внаслідок витікання газу теплова хвиля досягає поверхні ґрунту на п'яту добу. Змінювання температури на глибині 0,2 м через 6 діб з початку витікання газу становило над місцем витікання  $4,4 \text{ }^\circ\text{C}$ , на відстані 0,2 м –  $4,2 \text{ }^\circ\text{C}$ , 1 м –  $2,6 \text{ }^\circ\text{C}$ , 2,5 м –  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Дебіт другого й третього випускань газу дорівнював також  $70 \text{ м}^3/\text{добу}$ , але витікання газу моделювалися з бічної та верхньої частини поверхні газопроводу, а четверте витікання об'ємом  $200 \text{ м}^3/\text{добу}$  моделювалося з верхньої частини поверхні труби.

За характером розподілу температур та проведеними розрахунками зниження температури при дроселюванні, за температури газу в газопроводі від  $22$  до  $24 \text{ }^\circ\text{C}$  та тиску від  $4,4$  до  $4,8 \text{ МПа}$  мало б становити  $18,7 \text{ }^\circ\text{C}$ , але практично воно має менше значення, що пов'язане з втратою тепла на прогрівання шару ґрунту, який лежить над газопроводом.

Поряд із фізичним здійснено математичне моделювання температурного поля магістральних газопроводів, що передбачало два етапи:

1. Розрахунок двовимірного стаціонарного температурного поля в ґрунті навколо газопроводу без витікання газу (результатом цього розрахунку є початкове температурне поле у ґрунті для обчислення одновимірного нестаціонарного поля, а також температурна аномалія на поверхні ґрунту над магістральним газопроводом).

2. Розрахунок одновимірного нестаціонарного температурного поля у ґрунті й навколо магістральних газопроводів з витіканням газу.

Для згаданих задач було побудовано математичні моделі, розроблено алгоритми та складено програми їх чисельного розв'язання. Для задач дистанційного моніторингу магістральних газопроводів шляхом тепловізійної зйомки являє інтерес визначення температурних аномалій на поверхні ґрунту за відсутності витікання газу. Характер температури на цій поверхні залежить від багатьох чинників, пов'язаних із фізичними параметрами ґрунту, газопроводу та атмосфери.

Ґрунт – це багатозафазна капілярно-пориста система, теплопередача в якій здійснюється одночасно теплопровідністю крізь твердий шар, випромінюванням, конвекцією й теплопровідністю повітря у порах та внаслідок несення вологи.

Розв'язання задачі визначення температурного поля можливе лише за умови впровадження ряду спрощень. Ґрунт вважається квазіоднорідним середовищем з ефективними фізичними параметрами. У такому наближенні для стаціонарної задачі ґрунт характеризується єдиним параметром – ефективним коефіцієнтом теплопровідності. Для не дуже вологих ґрунтів даний коефіцієнт можна вважати незалежним від температури ґрунту, тобто задача лінеаризується (при цьому, однак, він може залежати від просторових координат внаслідок неоднорідності ґрунту та глибини або наявності снігового покриву чи рослинності, які враховуються введенням додаткового шару зі своїм ефективним коефіцієнтом теплопровідності).

Температурне поле ґрунту у реальних природних умовах формується під дією атмосферних процесів і сонячної радіації. На поверхні ґрунту виконуються умови теплового балансу навколишнього середовища з врахуванням поглинання, відбиття й розсіяння сонячної радіації, турбулентного теплообміну між ґрунтом і повітрям, втрат тепла на випаровування та геотермальних потоків. На не дуже вологих ґрунтах головну роль грають турбулентний теплообмін і сонячна радіація. Враховуючи ці ефекти, рівняння теплового балансу навколишнього середовища моделюється граничними умовами 3-го роду з ефективним коефіцієнтом теплообміну (сумою конвекційного та радіаційного коефіцієнтів) і з еквівалентною температурою повітря, в якій враховується дія сонячної радіації.

Згідно з проведеним оцінюванням, час встановлення температурної аномалії на поверхні ґрунту над трубопроводом, заглибленим на 1 м становить від 3 до 10 діб. Тому для визначення амплітуди температурної аномалії слід виконувати розрахунки з коефіцієнтами, усередненими за період від 3 до 10 діб до моменту спостереження з врахуванням погодних умов і стану атмосфери.

При моделюванні тривимірного температурного поля навколо магістральних газопроводів з витіканням газу, окрім згаданих уже параметрів, потрібні щільність і коефіцієнт питомої теплоємності ґрунту. Для не дуже вологих ґрунтів за відсутності фазових перетворень ці параметри можна вважати постійними.

У задачі визначення температурної аномалії на поверхні ґрунту над магістральним газопроводом з витіканням газу необхідно сукупно порахувати нестационарне температурне поле за наявності нелінійного об'ємного джерела тепла та теплообмін між ґрунтом і газом, що витікає. Ця задача має розв'язуватися у повній постановці.

Газопровід розглядають як циліндричне джерело тепла у напівобмеженому просторі (грунті) із відомими теплофізичними властивостями. На межі "труба-грунт" задано граничну умову 1-го роду, на поверхні ґрунту – граничну умову 3-го роду, що моделює радіаційний баланс навколишнього середовища і конвективний теплообмін із повітрям.

Двовимірне стаціонарне температурне поле у ґрунті навколо трубопроводу за відсутності витікання газу визначається шляхом інтегрування рівняння теплопровідності з відповідними граничними умовами

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0.$$

Інтегрування диференціального рівняння виконується методом у розрахунковій області, яка являє собою прямокутник з вирізом у вигляді півкруга. Знизу розрахункова область обмежується глибиною нейтрального шару, збоку границя розрахункової області вибирається за межами зони дії газопроводу. У розрахунковій області впроваджується прямокутна нерегулярна різницева сітка, яка ущільнюється у напрямку магістральних газопроводів, при цьому в області навколо газопроводу крок різницевої сітки вибирається постійним і мінімальним за двома координатами. Півкруг, котрий моделює границю "труба-грунт" апроксимується кусково-ламанною лінією, яка проходить через вузли різницевої сітки. Чисельні розрахунки двовимірного стаціонарного температурного поля виконувалися з використанням ітераційного методу верхньої релаксації.

Температурна аномалія у ґрунті навколо магістральних газопроводів без витікання газу визначається такими параметрами – ефективним коефіцієнтом теплопровідності ґрунту, ефективним коефіцієнтом теплообміну на поверхні (сумою конвекційного та радіаційного коефіцієнтів), еквівалентною температурою повітря з врахуванням дії сонячної радіації, температурами газу в магістральних газопроводах і ґрунту за межами зони впливу газопроводу на глибині його залягання.

У задачі розрахунку нестаціонарного температурного поля витікання газу з магістрального газопроводу моделюється пористим каналом прямокутного поперечного перерізу, яким тече газ у вертикальному напрямку від місця витікання на трубопроводі до поверхні ґрунту. Така ідеалізація реального процесу дифузії (фільтрації) газу в ґрунті за наявності гравітаційного поля є цілком правдоподібною для витікань з малими втратами газу.

Одновимірне протікання газу каналом постійного поперечного перерізу, заповненого пористим тілом, розглядається у квазістаціонарному наближенні як ізобарне із заданим витіканням газу: при цьому рівняння руху газу вилучається з повної системи рівнянь. Рівняння енергії для двофазного середовища розкладається на два рівняння – для кожної фази відповідно.

У рівнянні енергії для твердої фази (пористого ґрунту) з'являється ефективно об'ємне джерело, яке моделює теплообмін з газом

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \alpha \psi (T_g - T),$$

де  $T$  – температура газу;

$\alpha$  – коефіцієнт теплообміну між ґрунтом і газом;

$\psi$  – питома площа теплообміну.

Рівняння енергії для газової фази має вигляд

$$G C_p \frac{dT_g}{dY} = \alpha \psi S_k (T_g - T),$$

де  $G$  – втрата газу через витікання,

$C_p$  – питома теплоємність газу,

$S_k$  – площа поперечного перерізу каналу витікання.

Система рівнянь розв'язується за допомогою розрахункової області, котра являє собою паралелепіпед з циліндричним вирізом, який моделює трубопровід. Різницєва сітка у площині, перпендикулярній напрямку магістрального газопроводу, вибирається як складова різницєвої сітки попередньої задачі, розв'язання якої у вузлах сітки використовується як початкове температурне поле. У напрямку осі вздовж трубопроводу різницєва сітка будується аналогічно до сітки у напрямку осі  $x$ . Граничні умови по осі  $g$  подібні до граничних умов по осі  $x$  – використовується умова симетрії при  $x=0$ , на віддалених від витікання межах розрахункової області використовуються граничні умови 1-го роду.

Диференціальне рівняння на нерегулярній тривимірній різницєвій сітці апроксимується явною скінченою схемою першого порядку наближення по просторових змінних і часу.

У процесі математичного моделювання стаціонарного температурного поля проведено варіанти розрахунків для магістрального газопроводу діаметром 1000 мм, заглибленого на 1500 мм (від осі трубопроводу). Температурне поле визначається двома параметрами – ефективним коефіцієнтом теплопровідності та коефіцієнтом тепловіддачі ґрунту. Типові значення коефіцієнта теплопровідності перебувають у межах від 0,5 до 4 Вт/мК, а значення коефіцієнта тепловіддачі – від 10 до 50 Вт/мК.

У задачі моделювання тривимірного нестационарного температурного поля в ґрунті навколо трубопроводу з витіканням газу виникають 6 незалежних параметрів, котрі характеризують ґрунт, витікання та умови теплообміну між газом витікання і ґрунтом.

У роботі [2] досліджено залежність розв'язання від параметрів, що являють найбільший інтерес, при фіксованих значеннях інших параметрів. Розрахунки виконано для умов, які відповідають течії газу на полігоні з модельованим витіканням. Температура газу у газопроводі 25 °С, у місці витікання 5 °С, температура поверхні ґрунту 15 °С. Темпе-

ратурна аномалія на поверхні ґрунту має форму слабовитягнутого еліпса з круглим холодним ядром у центрі, розмір аномалії – від 1 до 2 м.

Процес формування температурної аномалії над витіканням складається з двох етапів. На першому з них, що триває дві доби, формується циліндричний канал витікання з розподілом температури вздовж каналу, який у подальшому майже не змінюється. На другому етапі в результаті дифузії тепла в ґрунті навколо каналу стається вирівнювання розмірів температурної аномалії з розмиванням перехідної області. З досягненням аномалією розміру, коли встановлюється баланс середовища між теплом, що надійшло в зону аномалії, та теплом, яке передалося холодному газу витікання, формування аномалії припиняється.

У процесі математичного моделювання тривимірного нестационарного температурного поля встановлено значення амплітуди температурної аномалії відносно фону, які узгоджуються з результатами натурного моделювання. За даними математичного моделювання можна оцінювати амплітуду температурної аномалії у зоні витікання та розподілу температур у непорушених умовах. Важливим чинником є рельєф. Експерименти на ділянках з різною просторовою орієнтацією схилів показали, що варіації температур у складному рельєфі можуть досягати десятків градусів і значно перевищувати за амплітудою температурні збурення, створювані витіканням газу.

На підставі аналізу зазначених чинників визначено оптимальні умови виконання робіт, обґрунтовано вибір сезону, погодних умов і часу доби, коли їх вплив мінімізується й дає змогу впевнено виявляти витікання газу пропонованими методами. Проведені дослідження поряд із розробленням технології виконання робіт уможливають формулювання технічних вимог до вимірювальної апаратури та розробку на цих засадах автоматизованого спектрометричного комплексу дистанційного виявлення малих витікань газу на лінійній частині магістральних газопроводів. Однією зі складових даної технології є моніторинг поля температур і концентрацій газу вздовж трас магістральних газопроводів.

До автоматизованого спектрометричного комплексу входять: тепловізійна система, лазерний газоаналізатор, навігаційна супутникова система, система відеоспороження, апаратура для накопичування і первинного оброблення інформації на базі ПЕОМ.

Комплекс апаратури розраховано на найбільш легкі й дешеві повітряні носії, а для його монтажу на борту літака чи вертольота опрацьовано технічну документацію. Технологію та апаратурний комплекс оснащено необхідним програмним забезпеченням для накопичування, зберігання й оброблення інформації.

Іншим цікавим напрямком дистанційного обстеження газопроводів є застосування методу радіометрії. Він заснований на вимірюванні температури на трубопроводі. Було проведено аналіз НВЧ-випромінювання неоднорідно зволжених ґрунтів, одержано оцінки

якості виявлення температурних аномалій та змодельовано кілька варіантів технічної реалізації комплексу. В результаті теоретичних досліджень розроблено й створено макет автоматичного варіанта комплексу, до складу якого входить сканувальна антенна система, два кореляційні радіометри з робочою частотою 400 МГц та 900 МГц, блок цифрового оброблення інформації, автономне джерело живлення, контрольно-вимірвальна апаратура. Для керування комплексом, встановлення й документування параметрів, оброблення інформації, її перегляду та зберігання розроблено програмне забезпечення.

Експериментальний комплекс двочастотного радіометричного зондування пройшов польові випробування на магістральному газопроводі Шебелинка-Дніпропетровськ-Кривий Ріг-Ізмаїл діаметром 1220 мм. Програма цих випробувань містила дослідження ситуації радіозавад у районі дослідного полігона в діапазоні від 0,2 до 1,3 ГМГц, оцінювання впливу кутів зондування трубопроводу, зняття радіотеплових характеристик ґрунтів у двох частотних діапазонах за різної поляризації та у будь-який час доби, дослідження температури ґрунту при витіканні газу.

Вивчення обстановки радіозавад у районі польових випробувань виявило наявність активних джерел радіосигналів на частотах 200, 636, 750 МГц, а та кож імпульсних джерел завад на частотах 850 МГц та 1,28 ГМГц, що вимагало використання додаткових преселекторів [3].

Увесь цикл експериментальних досліджень провадили при температурі газу в трубопроводі 27 °С та тискові 4,5 МПа.

Дослідження ступеня впливу кута зондування трубопроводу довели доцільність функціонування комплексу під кутами місця близькими до 60° або меншими 30°.

Аналіз одержаних карт ґрунту поблизу магістральних газопроводів дає змогу зробити висновок про те, що на формування карт істотно впливає фізична температура, вологість ґрунту, його щільність і склад. Однак, незважаючи на значну дисперсію результатів вимірювань, спостерігалось підвищення радіотеплової температури на частоті 900 МГц безпосередньо над газопроводом більш як на 4 К. На частоті 400 МГц однозначне виявлення трубопроводу стало неможливим через значний скін-шар ґрунту за невеликої його вологості, хоча профіль температури від трубопроводу становив від 1,0 до 3,5 К. Оцінка якості виявлення газопроводу при змінюванні поляризації належним чином не досліджена.

### **Висновки**

Одержано також результати нормованого радіотеплового картування ґрунту при штучній течі газу – 70 м<sup>3</sup>/добу у двох частотних діапазонах. Зондування виконувалося в стаціонарному становищі при куті місця рівному 40° по тому ж самому азимутальному рядку в діапазоні від -40° до +40°. Усі наступні вимірювання нормувалися до першого рядка, знятого без витікання газу. Сканування здійснювалося через ко-



жні 20 хв. протягом 160 хв. У діапазоні 400 МГц максимальне пониження температури спостерігалось, як правило, від 60 до 100 хв. з наступною стабілізацією позірної температури до рівня 0,6 К. Нормоване радіотеплове картування на частоті 900 МГц показало більш стабільне пониження температури над газопроводом після 20 хв. витікання і становило 1,2 К.

Здійснені теоретичні дослідження та польові випробування комплексу виявлення витікань газу на магістральних газопроводах підтвердили принципову можливість створення мобільної системи контролю стану газопроводів у дециметровому діапазоні довжини хвиль.

### *Література*

1. Абрамович Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1969. – 544 с.
2. Грудз В.Я., Грудз Я.В. Оптиміальне планування режимів роботи газотранспортних систем в умовах багатокритеріальності // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ ІФНТУНГ. Вип. 32. 1995, С. 12-15.
3. Ходанович И.Е., Кривошеин Б.Л., Бикчентай Р.Н. Тепловые режимы магистральных газопроводов. – М.: Недра, 1971. – 216 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії 04.06.2018 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., професором Грудзом В.Я.,  
д.т.н., професором Говдяком Р.М. (м. Київ)*

## REMOTE CONTROL OF HERMETICITY MAGISTRAL GAS PIPELINES

**R. T. Martyniuk**

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;  
76019, Ivano-Frankivsk, Carpathians str., 15;  
ph. +380 (3422) 72-71-38; e-mail: snp@nunq.edu.ua*

*It is known, that in the process of exploitation of main gas pipelines there are violations of impermeability, which show up as effluences of gas in surrounding, creating the threat of contamination of environment and are potentially dangerous for the origin of refusals of the system. On the surface of – rountou such effluences have the displays as temperature anomalies on a natural temperature background and anomaly of concentrations of hydrocarbons. Unlike the anomalies of other origin, in the area of effluence they practically do not rely on spatial co-ordinates and time.*

**Key words:** *violations of impermeability, temperature anomalies, co-ordinates.*