

# ***Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища***

УДК 622.691

## **УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ДІАГНОСТУВАННЯ ВИТОКІВ З ГАЗОПРОВОДУ НА ОСНОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ЗБУРЕНЬ**

**В. Я. Грудз, В. Я. Грудз (молодший)**

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

*Розглядаються питання удосконалення діагностики малих аварійних витоків з газопроводу, що базуються на аналізі нестационарних процесів, викликаних збуренням від появи витoku. Дається оцінка впливу параметрів режиму роботи газопроводу на точність визначення координати витoku. Аналізується залежність швидкості розповсюдження малих збурень в потоці газу від характеру технологічного процесу та його параметрів. Показано вплив параметрів стану газу і його вологовмісту на зміну швидкості розповсюдження звукової хвилі в газовому потоці, в гетерогенній суміші з краплями вологи. Зроблено висновки про доцільність і необхідність врахування залежності швидкості звуку від параметрів режиму в задачах діагностування.*

**Ключові слова:** *діагностика, аварійні витoki, швидкість звуку, діагностична модель.*

Проблема діагностування малих витоків з газопроводів останнім часом стала особливо актуальною. З одного боку це пов'язано з старінням газотранспортних магістралей і в зв'язку з цим високою вірогідністю появи витоків в результаті корозійних процесів, а з іншого – з несанкціонованими відборами газу. У всякому випадку для визначення координати аварійного витoku на трасі газопроводу необхідна діагностична модель, основними вимогами до якої є достовірність і точність результатів. Серед множини існуючих діагностичних моделей слід виділити особливий напрямок, що базується на аналізі нестационарних процесів в газопроводі, викликаних появою витoku газу. Мізерні значення величини витрати аварійного витoku в порівнянні з витратою га-

зу в газопроводі не дозволяють за допомогою сучасної вимірювальної техніки оцінити зміну стаціонарного режиму газопроводу для діагностики витoku. В [1] показано, що поява витoku в умовах нестационарного руху газу призводить до зміщення фази коливального процесу, пропорціонального відстані до витoku.

Створена математична модель побудована на основі рівнянь руху та нерозривності з урахуванням дії витoku газу. Врахування дії інерційних сил в потоці газу призведе до рівняння, яке в математичній фізиці має назву неоднорідне телеграфне рівняння.

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{2a}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + \frac{2aq}{F} \delta(x - x_1), \quad (1)$$

де  $P(x, t)$  – тиск в газопроводі як функція лінійної координати  $x$  і часу  $t$ ;  $q$  – витрата витoku;  $2a$  – коефіцієнт лінеаризації;  $\delta(x - x_1)$  – функція джерела Дірака;  $c$  – швидкість звуку в газі.

Реалізація математичної моделі при стаціонарних початкових і стрибкоподібно змінених граничних умовах методом інтегральних перетворень дає

$$\begin{aligned} P(x, t) = & \left(1 - \frac{x}{L}\right) \sum_{n=1}^{\infty} [P_1 - P_2(-1)^n] + \frac{qL}{c^2} \left\{ \frac{x(L-l_a)/L^2 n\pi x \leq l_a}{l_a(L-l_a)/L^2 n\pi x > l_a} \right\} + \frac{2}{c^2} \left(1 - \frac{x}{L}\right) \times \\ & \times e^{-at} \sum_{n=1}^{\infty} [(P_H - P_1) - (P_K - P_2)(-1)^n] \frac{1}{\omega_n} (\sin \omega_n t + \cos \omega_n t) - \frac{qL}{\pi c^2} e^{-at} \times \\ & \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n\omega_n} \sin \frac{\pi n x}{L} [\cos(\omega_n t + \varphi) - \cos(\omega_n t - \varphi)] [\sin(\omega_n t + \varphi) - \sin(\omega_n t - \varphi)]. \end{aligned} \quad (2)$$

Частота коливань тиску  $\omega_n$  визначає власну частоту коливань газового потоку в трубопроводі з шляховим відбором і є характеристикою газопроводу

$$\omega_n = \frac{1}{2L} \sqrt{(2\pi n c)^2 - \left(\frac{\lambda W}{4d} L\right)^2}. \quad (3)$$

В момент виникнення витoku з газопроводу фаза коливного процесу одержує зміщення на величину  $\varphi_n$ , яка пов'язана з координатою витoku залежністю

$$\varphi_n = \frac{\pi n x_1}{L}. \quad (4)$$

Для достовірної оцінки координати витoku необхідно з заданою точністю визначити частоту коливань тиску і фазове зміщення, які залежать від швидкості розповсюдження малих збурень в газопроводі, що є адекватною швидкості звуку в газі. Тому для визначення координати аварійного витoku необхідно уточнити значення швидкості звуку в газі.

В класичній газодинаміці швидкість звуку в газі визначається залежністю

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)_s}, \quad (5)$$

де  $E$  – модуль Юнга;  $s$  – ентропія.

Як вказується в [2], за умов руху газу в газопроводі швидкість розповсюдження збурень набагато перевищує швидкість теплообміну, тому процес можна вважати адіабатним, і для швидкості звуку отримати формулу

$$c = \sqrt{kRT}, \quad (6)$$

$k = c_p / c_v$  – показник адіабати.

На основі (5) і (6) можна стверджувати, що швидкість звуку залежить від тиску і температури середовища, які при стаціонарному русі газу в газопроводі змінюються по довжині. Тому швидкість звуку є функцією лінійної координати. Важливо встановити наскільки суттєвою є ця залежність, і чи слід її враховувати в задачах діагностування малих витоків з газопроводу.

Для відповіді на поставлені запитання розглянемо стаціонарний потік газу в трубопроводі, вважаючи рухоме середовище гомогенним. Рівняння енергії газового потоку в диференціальній формі матиме вигляд

$$gdz + du + d\left(\frac{P}{\rho}\right) + d\left(\frac{w^2}{2}\right) + gdh = 0, \quad (7)$$

де  $z$  – геодезична позначка профілю траси;  $u$  – питома внутрішня енергія газу;  $P$ ,  $w$  – тиск і лінійна швидкість в газовому потоці;  $h$  – гідравлічні втрати напору.

Питома потенційну енергію потоку представимо у вигляді

$$gdh = gd(z + h) = gH, \quad (8)$$

$$d\left(\frac{P}{\rho}\right) = \frac{dP\rho - d\rho P}{\rho^2} = \frac{d\rho}{\rho} \left(\frac{dP}{d\rho} - \frac{P}{\rho}\right) = c^2 \frac{k-1}{k} \frac{d\rho}{\rho}.$$

Питома внутрішня енергія  $du = c_v dT$ .

Зміна питомої кінетичної енергії  $d\left(\frac{w^2}{2}\right) = wdw$ .

Тоді рівняння енергії для одномірного стаціонарного потоку газу матиме вигляд

$$\rho c_v \frac{dT}{dx} + c^2 \frac{k-1}{k} \frac{d\rho}{dx} + w \frac{d(\rho w)}{dz} + \rho g \frac{dH}{dx} = 0. \quad (9)$$

На основі аналізу рівняння нерозривності для газового потоку

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \frac{\partial(\rho w)}{\partial x}.$$

Можна стверджувати, що  $\frac{\partial(\rho w)}{\partial x} = 0$ . Окрім того, вважаємо, що  $\rho gH = P(x)$ , а з рівняння адиабати отримуємо

$$\frac{d\rho}{dx} = \frac{\rho_0}{P_0^{1/k}} P^{\frac{1-k}{k}} \frac{dP}{dx}, \quad (10)$$

де  $P_0$  – атмосферний тиск;  $\rho_0$  – густина газу при нормальних умовах.

З урахуванням приведених залежностей рівняння (8) зводиться до вигляду

$$\rho c_v \frac{dT}{dx} - \left( c^2 \frac{\rho_0}{P_0^{1/k}} P^{\frac{1-k}{k}} - 1 \right) \frac{d\rho}{dx} = 0. \quad (11)$$

Для умов стаціонарного режиму роботи газопроводу розподіл тиску і температури по довжині виражається залежностями

$$P_x = \sqrt{P_H^2 - \frac{P_H^2 - P_K^2}{L} x}; \quad T_x = T_0 + (T_H - T_0) \exp(-ax); \quad a = \frac{\pi K_T D}{M c_p}. \quad (12)$$

З врахуванням (10) рівняння (9) набуває вигляду

$$-\frac{\pi K_T D}{Qk} (T_H - T_0) \exp(-ax) + \left( c^2 \frac{\rho_0}{P_0^{1/k}} P_x^{\frac{1-k}{k}} - 1 \right) \frac{P_H^2 - P_K^2}{2LP_x} = 0. \quad (13)$$

Звідки

$$c_x^2 = \frac{P_x}{\rho} \left( 1 + \frac{\pi K_T D}{Qk} P_x \frac{(T_H - T_0) \exp(-ax)}{P_H^2 - P_K^2} \right). \quad (14)$$

У формулах (11)-(14) використано позначення:

$P_H, P_K$  – тиски на початку і в кінці ділянки газопроводу;  $T_H, T_0$  – температури на початку газопроводу і ґрунту;  $M, Q$  – масова і об'ємна продуктивності газопроводу;  $L, D$  – довжина і зовнішній діаметр газопроводу;  $K_T$  – повний коефіцієнт теплопередачі від газу до ґрунту.

Рівняння (14) дозволяє встановити залежність швидкості розповсюдження малих збурень в газовому потоці в залежності від лінійної координати за умов стаціонарного режиму.

З метою аналізу числових значень швидкості звуку в газовому потоці і їх зміни в залежності від параметрів режиму розглядався гіпотетичний газопровід довжиною 100 км і діаметром 1420x20 мм з тиском і температурою на початку 7,5 МПа і 313 К, тиском в кінці 5 МПа, температурою ґрунту 280 К, по якому перекачувався метан в умовах стаціонарного режиму. Для вказаних умов розраховувалися масова і об'ємна продуктивності газопроводу, депресія тиску, температурний режим і значення швидкості звуку в різних перерізах газопроводу. Метою чис-

лового дослідження була оцінка характеру і величини зміни швидкості звуку в залежності від параметрів режиму.

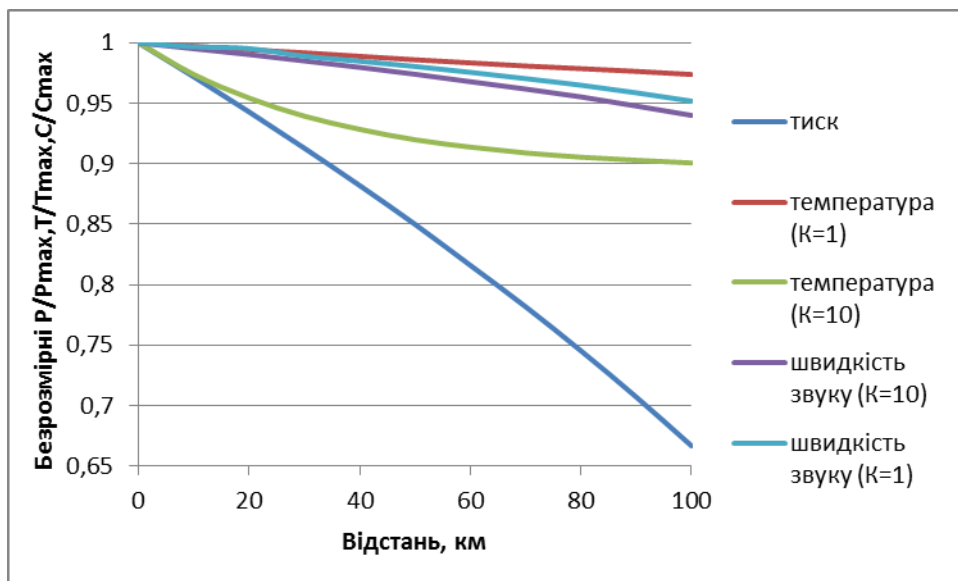


Рис. 1. Зміна параметрів режиму і швидкості звуку по довжині газопроводу

На рис. 1 приведено графічні залежності параметрів режиму і швидкості звуку в газовому потоці від лінійної координати за умов стаціонарного процесу руху газу. Встановлено, що за початкових умов ( $x=0$   $P=7,5$  МПа,  $T=313$  К) швидкість звуку складає 491,4 м/с, в подальшому зміна параметрів режиму по довжині газопроводу призводить до зниження числового значення швидкості звуку, і в кінцевому перерізі вона складає в залежності від повного коефіцієнта теплопередачі від газу до ґрунту 467,7 м/с (відносно значення  $K=1$ , кінцева температура 305,6К) до 461,9 м/с (відносно значення  $K=10$ , кінцева температура 281,9К). Середнє значення швидкості звуку по довжині в першому випадку складає 481 м/с, в другому – 477,8 м/с. Значення швидкості звуку, визначене за загальноприйнятою формулою (6), для умов початкової температури 313К складає 463,7 м/с (розбіжність 5,8%), для умов кінцевої температури при  $K=1$  – 458,2 м/с (розбіжність 2,1%), для умов кінцевої температури при  $K=10$  – 440,1 м/с (розбіжність 4,8%), для умов середньої температури 308,7К при  $K=1$  – 481 м/с (розбіжність 4,3%) і для умов середньої температури 290,9К при  $K=10$  – 477,8 м/с (розбіжність 4,4%).

Аналіз результатів показує, що розбіжності між значеннями швидкості звуку, визначеними за різними методиками 2,1-5,8%, причому чим менша реальна швидкість звуку, тим більша розбіжність між значеннями.

Зауважимо, що максимальна розбіжність між обчисленими за різними методиками значеннями швидкості звуку не перевищує 5,6%, що дозволяє в більшості випадків прогнозування нестационарних процесів користуватися залежністю (6). Однак, у випадках діагностування координати витоку в протяжних газопроводах вказана розбіжність може призвести до небажаної похибки, тому потрібно використовувати запропоновану методику для визначення швидкості звуку.

Всі отримані і наведені вище результати стосуються руху гомогенної суміші газів як неперервного середовища. На практиці такі випадки зустрічаються рідко, тільки при перекачуванні добре осушеного газу, коли температура газу у всіх перерізах газопроводу вища за температуру точки роси при робочих тисках. У випадку, коли компонентом рухомого неперервного середовища є водяна пара, можлива її конденсація в певних перерізах газопроводу, де температура газу не перевищує температуру точки роси. В таких випадках водяна пара скраплюється у вигляді туману, і рухоме середовище представляється як гетерогенна двокомпонентна суміш. В такому випадку швидкість звуку може бути знайдена на основі залежності Вуда

$$c = \frac{1}{\sqrt{\rho \left( \frac{\alpha_1}{\rho_1 c_1^2} + \frac{\alpha_2}{\rho_2 c_2^2} \right)}}, \quad (15)$$

де  $\rho = \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2$ ,  $\alpha_1, \alpha_2$  – молярні концентрації компонентів

Зауважимо, що формула Вуда для швидкості звуку в гетерогенних системах отримана за умови, що стан всього багатоконпонентного середовища описується рівнянням газового стану, а рух рівноважної двофазної системи описується відомими рівняннями руху однофазного середовища.

Щоб оцінити вплив випадіння вологи гомогенної суміші і утворення гетерогенної рухомої системи на величину швидкості розповсюдження звукової хвилі в потоці проведено числовий експеримент в умовах гіпотетичного газопроводу, характеристики якого приведено вище.

Якщо в газопровід подається суміш сухого метану і водяної пара, то вона залишається гомогенною до перерізу, в якому температура газу зрівнюється з температурою точки роси. В цей момент частина вологи переходить з парової фази в рідинну, що викликає утворення гетерогенної суміші газової фази і крапель рідини у вигляді туману. Краплі поступово укрупнюються і випадають в порожнину газопроводу, а їх місце займають нові краплі, які продовжують насичувати газову фазу. Рідина, що випала з потоку в порожнину газопроводу, переноситься по його довжині, утворюючи рідинні скупчення, характер розподілу яких вздовж траси приведено в [3]. Якщо газ по довжині газопроводу втра-

чає вологу (осушується), то наявність рідинних скупчень призводять до його насичення вологою. Тому можна стверджувати на основі результатів [3], що після досягнення точки роси насиченість газу вологою в крапельному вигляді практично не змінюється. За даними [4] вона складає близько 1-3%, подальше збільшення концентрації крапельної вологи в потоці призводить до її випадання в порожнину трубопроводу.

На рис. 2 приведено залежність температури газу від  $T_x$  та зміни температури точки роси  $T_r$  від довжини газопроводу. Для кожного з перерізів газопроводу визначалася швидкість звуку в потоці газу, причому до падіння температури газу до точки роси ( $x/L=0,2$ ) суміш газу і водяної пари вважалася гомогенною, що не впливало на швидкість звуку в потоці. Починаючи з перерізу, в якому температура газу дорівнює температурі точки роси, швидкість звуку розраховувалася для гетерогенної системи за залежністю Вуда (15), причому концентрація крапельної вологи вважалася сталою по довжині і рівною 0,01%, 0,1% та 0,5%.

Зауважимо, що збільшення концентрації крапельної рідини в гетерогенній суміші з газом призводить до зменшення швидкості розповсюдження звуку в середовищі. З фізичної точки зору цей факт пояснюється зростанням густини гетерогенної суміші при майже незмінному модулю пружності, що у відповідності до (5) дає ефект зменшення швидкості звуку в середовищі, що повністю узгоджується з формулою Вуда.

На рис. 2 характер зміни швидкості звуку по довжині газопроводу з урахуванням виникнення гетерогенної суміші в потоці з різною концентрацією крапельної рідини представлені графіками  $C_0$  (крапельна волога відсутня),  $C(0,01\%)$  (молярна концентрація крапельної вологи в потоці складає 0,01%),  $C(0,1\%)$  (молярна концентрація крапельної вологи в потоці складає 0,1%) і  $C(0,5\%)$  (молярна концентрація крапельної вологи в потоці складає 0,5%)

Характер графіків показує, що зміна умов газового потоку в газопроводі (в тому числі утворення крапельної вологи) призводить до зменшення величини швидкості звуку. При концентрації крапельної вологи в газопроводі 0,01% зменшення швидкості звуку в середовищі складає 0,27%, збільшення концентрації до 0,1% веде до зниження швидкості звуку на 2,21%, а при зростанні концентрації до 0,5% швидкість звуку в середовищі зменшуються на 5,21%. Розрахунки показують, що при зростанні концентрації крапельної вологи в потоці газу до 1% швидкість звуку в середовищі зменшується на 13,12%, а при концентрації 3% – на 23,36%. Такі відхилення швидкості звуку від величини, визначеної загальноприйнятим методом на основі (6), можуть суттєво спотворити результати діагностування координати малих витоків з газопроводу, що вимагає врахування впливу властивостей середовища на величину швидкості звуку в потоці при реалізації задач діагностики.

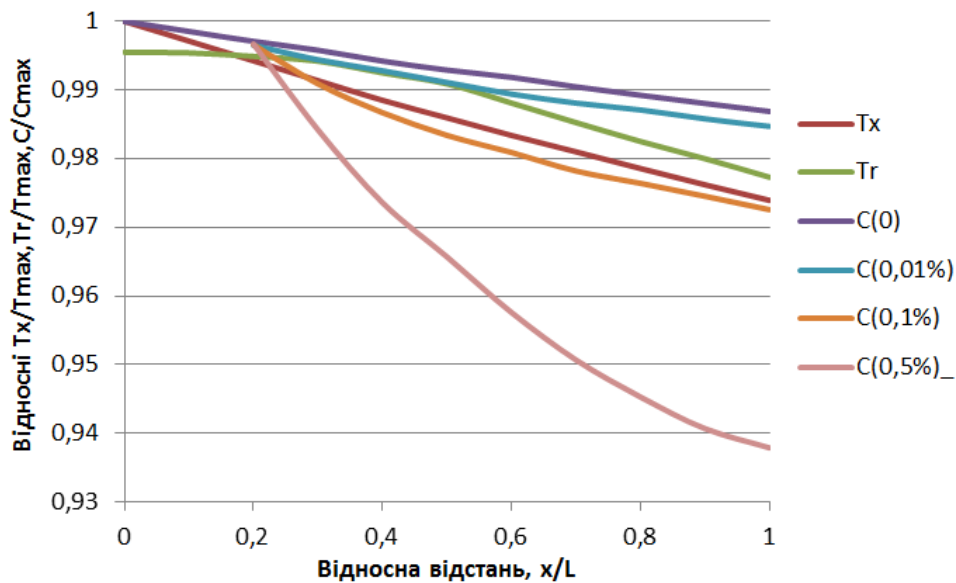


Рис. 2. Зміна температури газу і швидкості звуку по довжині газопроводу

### *Література*

1. Грудз В.Я. Діагностування малих витоків з трубопроводу / В.Я. Грудз, Я.В. Грудз, В.Д. Фейчук // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. – 1999. – Вип.36. – С. 42-44.
2. Ковалев Ю.М. Анализ инвариантности относительно преобразования Галлилея двухфазных математических моделей гетерогенных сред / Ю.М. Ковалев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2014. – Том 6, №1. – С. 30-35.
3. Якимів М.М. Аналітичні дослідження характеру розподілу рідинних відкладень по довжині газопроводу / М.М. Якимів // Нафтогазова галузь України. – 2015. – №2. – С. 25-28.
4. Грудз Я.В. Энергоэффективность газотранспортных систем / Я.В. Грудз // Ивано-Франківськ. – Лілея НВ, 2012. – 186 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії 26.01.2017 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., професором Тимківим Д.Ф.  
д.екон.н., професором Давимуюкою С.А. (м. Львів)*

## **IMPROVEMENT METHODS OF DIAGNOSING LEAKAGE FROM THE PIPELINE ON THE BASIS OF RESEARCH DISTURBANCES PROPAGATION PROCESS**

**V. Ya Grudz, V. Ya Grudz (Jr.)**

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;  
76019, Ivano-Frankivsk, Carpathians str., 15; e-mail: snp@nung.edu.ua*



*Questions of improving the diagnosis of small accidental leaks from the pipeline, based on the analysis of non-stationary processes induced perturbation of occurrence of leakage. The estimation of the impact of the profile of the pipeline on the accuracy of the coordinates of the leak. We analyze the dependence of the velocity of small perturbations in the flow of gas from the nature of the process and its parameters. The influence of the parameters of the gas and its moisture content to change the velocity of sound waves in the gas stream. in a heterogeneous mixture with water drops. The conclusions of the feasibility and necessity of considering the speed of sound depending on the profile in diagnosing problems.*

*Keywords: diagnosis, emergency leaks speed of sound, diagnostic model.*