

## Діагностика виявлення витоків нафтопродуктів у магістральних нафтопроводах

Анатолій Обшта<sup>1</sup>, Олександр Шкурган<sup>2</sup>

<sup>1</sup> д. т. н., професор, Кафедра обчислювальної математики та програмування НУ"ЛП", вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, e-mail: [anatolii.f.obshta@lpnu.ua](mailto:anatolii.f.obshta@lpnu.ua)

<sup>2</sup> ФОП у сфері інжинірингу, геології та геодезії, проїзд Ів. Богуна 2, 10005, Житомир, [fop.shkurgan@gmail.com](mailto:fop.shkurgan@gmail.com)

*Розглянута проблематика виявлення витоків нафтопродуктів та принципи розроблення математичних моделей локалізації витоків і оцінок обсягів їх витоків, що стаються внаслідок несанкціонованого втручання зловмисників у роботу трубопроводу. Виконано аналіз фізико-математичних методів виявлення витоків у мережах трубного транспорту. Проаналізовано нелінійні математичні моделі системи контролю виявлення витоків нафтопродуктів вздовж контрольованої ділянки трубопроводу. Застосовано методику обробки експериментальних даних і подання отриманих результатів до задачі визначення місця та обсягу витoku нафтопродукту запропонованою системою виявлення витоків. Розроблена структура електронної системи виявлення витоків мовою Verilog HDL.*

**Ключові слова:** вимірювання витоків, витрати витоків, метод негативних хвиль тиску.

**Вступ.** Впровадження у виробничий процес системи виявлення витоків, служить підвищенню ефективності функціонування системи магістральних нафтопроводів, їх екологічної і технічної безпеки [1]. На сьогодні використовується велика кількість методів виявлення та локалізації витоків. В цілому їх можна поділити на зовнішні методи, внутрішні або обчислювальні методи та візуальні/інспекційні методи.

Внутрішні методи виявлення витoku працюють на основі моделі або алгоритмічного принципу, який контролює параметри потоку в режимі реального часу. Зовнішні методи виявлення витoku працюють на неалгоритмічному принципі фізичного виявлення товару, що витікає, за допомогою спеціальних зовнішніх давачів. Візуальні або інспекційні методи плануються через регулярні проміжки часу та виконуються людьми або навченими собаками для візуальної перевірки на землі, роботами для перевірки підводних трубопроводів і приладами для повітряної перевірки для спостереження з повітря.

### 1. Огляд літературних джерел та постановка завдання

Огляд літературних джерел показує, що найбільш ефективним способом контролю за технічним станом лінійної частини нафтопроводів є

внутрішньотрубна діагностика. Виділимо методи, які ґрунтуються на моніторингу тиску/потoku.

Одним з шляхів виявлення та локалізації витоків нафти та нафтопродуктів є гідродинамічні дослідження їх руху у перфорованих трубах. При дослідженні таких задач дискретний розподіл точок відбору продукту може замінятися неперервними розподілами. Тоді дослідження відповідних задач зводяться до вивчення нестационарного руху рідини у трубах з проникними стінками. Аналітичним та числовим дослідженням математичних моделей нестационарного руху рідин з різними реологічними властивостями в трубах з проникними стінками присвячені роботи [2, 3, 4]. Іншим шляхом дослідження витоків продукту є підхід, за якого припускається, що штучно утворений зловмисниками витік нафти один. Однак, необхідно виявити та ліквідувати його негайно. Для вирішення цієї задачі необхідно проектувати та реалізовувати автоматизовану систему моніторингу роботи трубопроводу. Теоретичною основою методу локалізації витoku має бути ефективна математична модель визначення місця витoku та маси витoku. Ефективність системи виявлення витоків означає, що місце витoku та маса витoku мають визначатися з великою точністю за малий проміжок часу. Відомі нам методи [5, 6, 7, 8], які ґрунтуються на моніторингу тиску/потoku забезпечують ще недостатню точність місця виявлення витoku і тому все ще необхідно застосовувати комплексні заходи, використовуючи різні комбінації внутрішніх, зовнішніх та інспекційних методів, що значно здорожчує процес моніторингу транспортування товару.

Метою роботи є аналіз нелінійної математичної моделі системи виявлення витоків нафтопродуктів вздовж контрольованої ділянки трубопроводу, на основі якої можна було б модернізувати програмно-апаратне забезпечення, яке здатне здійснювати постійне спостереження з метою виявлення витоків та моделювання структури електронної системи виявлення витоків [9].

## **2. Нелінійна математична модель виявлення витоків.**

Перебіг у трубопроводах можна повністю описати, якщо відомий тиск, швидкість потoku, щільність, температура. Ці параметри можна отримати шляхом розв'язання системи диференціальних рівнянь руху, неперервності, енергії, стану. У ряді випадків, коли температура рідини близька до температури навколишнього середовища, перенесенням тепла в радіальному напрямку можна знехтувати, тому рівняння енергії можна не записувати, вважаючи рух ізотермічним.

Враховуючи ці та інші спрощення можна записати систему двох нелінійних диференціальних рівнянь першого порядку у частинних похідних з постійними коефіцієнтами:

$$\frac{\partial p(x,t)}{\partial t} + \rho_0 c^2 \frac{\partial u(x,t)}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial p(x,t)}{\partial x} = -\frac{1}{2} b \rho_0 u^2(x,t) \quad (2)$$

та рівняння стану у першому наближенні:

$$\rho(x, t) = \rho_0 \left( 1 - \frac{p(x, t) - p_0}{k_z} \right). \quad (3)$$

Тут  $\rho_0$  – густина нафтопродукту при тиску  $p_0$ ;  $k_z$  – модуль об’ємного стиску;  $c$  – швидкість поширення хвиль тиску (і витрати) в трубопроводі (константа Жуковського).  $b = \langle \lambda(Re, \varepsilon) \cdot \frac{1}{d} \rangle = const$ . Позначення  $\langle \cdot \rangle$  означає середнє значення виразу, який записаний замість крапки.

Продиференціювавши рівняння (1) по  $x$  а рівняння (2) – по  $t$  та виключивши  $\frac{\partial^2 p(x, t)}{\partial x \partial t}$ , одержимо нелінійне параболічне рівняння та розглянемо задачу: визначити швидкість  $u(x, t)$  потоку нафтопродукту

$$u(x, t) \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2}, \quad (4)$$

де  $0 < x < l$ ,  $0 < t \leq T$ ,  $a^2 = \frac{c^2}{b}$ .

Вважаємо, що для рівняння (4) відома початкова умова

$$u(x, 0) = f_1(x) \quad (5)$$

та граничні умови

$$u(0, t) = g_1, \quad u(l, t) = g_2. \quad (6)$$

Вважаємо також, що для тиску  $p(x, t)$  також відома початкова умова

$$p(x, 0) = p_0 \quad (7)$$

та граничні умови

$$p(0, t) = h_1 \quad p(l, t) = h_2 \quad (8)$$

Враховуючи, що значення  $\xi$ , тобто, відстань від місця викиду нафтопродукту до місця витоку, розбиває відрізок  $0 < x < l$  на два відрізки  $0 < x < \xi$  та  $\xi < x < l$ , слід знаходити розв’язки  $u_-(x, t)$ ,  $u_+(x, t)$  відповідних задач для цих відрізків з врахуванням умови спряження:

$$u_-(\xi, t) \rho_-(\xi, t) - u_+(\xi, t) \rho_+(\xi, t) = -\frac{m_\xi}{S}, \quad (9)$$

яка є наслідком умови

$$\frac{\partial(u(x, t) \rho(x, t))}{\partial t} = -\frac{m_\xi}{S} \delta(x - \xi), \quad (10)$$

де  $m_\xi$  – витрати маси нафтопродукту на витік за одиницю часу,  $S$  – площа поперечного перерізу трубопроводу та  $p_+(\xi) = p_-(\xi)$ .

Зауважимо, що  $m_\xi = m_0 - m_l$ , де  $m_0 = Su_-(0, t) \rho_-(0, t)$ ,  $m_l = Su_+(l, t) \rho_+(l, t)$ .

Отже, завдання полягає у визначенні пари  $\{u(x, t), \xi\}$ , що задовольняє умови (4) – (10). Поставлена задача належить до класу обернених задач математичної фізики. Для аналітичного дослідження часткових випадків задачі (4, 5, 6, 7) автори скористалися узагальненим методом Фур’є. Чисельне розв’язання задачі (4)–(10) виконано методом, запропонованим в [4].

Результати порівняння експериментальних даних та розрахунків СВВ визначення місця витоку нафтопродукту і маси витоку нафти вздовж контрольованої ділянки трубопроводу наведені в таблицях 1,2, які є фрагментом протоколу випробувань СВВ на ділянці магістрального нафто трубопроводу ВАТ

“Рівнеоблнафтопродукт”. Протяжність трубопроводу 74 км. Нафтопродукт - дизельне паливо. Місце виконання відбору 12,116 км. Діаметр труби 530 мм. Тиск на викиді перекачуючої станції – 19,7 кгс/см<sup>2</sup>. Тиск на прийомі (в кінці труби) – 13,4 кгс/см<sup>2</sup>. Тиск у точці відбору – 19,2 кгс/см<sup>2</sup>. В таблицях використовуються позначення: *n* – номер експерименту в табл. 1 та розрахункові дані експерименту *n* в табл. 2; *A* – час початку відкривання ділянки нафтопроводу (год:хв:сек); *B* – тривалість відкривання (с); *C* – час початку закривання (год:хв:сек); *D* – тривалість закривання (с); *E* – діаметр отвору дросельної шайби (мм); *F* – витрати відбору (л/хв); *G* – розрахунковий час (год:хв:сек); *H* – час фіксації (год:хв:сек); *I* – координата відбору (км); *J* – похибка (км); *K* – розрахунковий час (год:хв:сек); *L* – час фіксації (год:хв:сек); *M* – координата відбору (км); *N* – похибка (км).

Таблиця 1

Відбір нафтопродукту

Відбір						
<i>n</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	<i>E</i>	<i>F</i>
1	13:55:00	1	13:55:16	1	4	33
2	14:05:00	1	14:05:16	1	4	33
3	14:15:00	1	14:15:16	1	4	33
4	14:25:00	5	14:25:20	5	4	33

Таблиця 2

Результати розрахунків СВВ

СВВ								
58	Відкривання				Закривання			
<i>n</i>	<i>G</i>	<i>H</i>	<i>I</i>	<i>J</i>	<i>K</i>	<i>L</i>	<i>M</i>	<i>N</i>
1	13:55:13	13:55:50	12,58	0,464	13:55:20	13:56:10	12,58	0,464
2	14:05:12	14:05:50	12,01	-0,106	14:05:30	14:06:14	12,01	-0,106
3	14:15:50	14:15:50	12,29	0,174	14:15:13	14:16:10	12,29	0,174
4	14:25:14	14:25:50	11,73	-0,386	14:25:28	14:26:16	12,29	0,174

Результати аналізу експериментальних даних використані для моделювання структури електронної системи виявлення витоків мовою Verilog HDL. Система складається з чотирьох основних частин розділених на незалежні модулі. Дизайн реалізований на ПЛІС Spartan 7 від компанії Xilinx, яка може містити в собі до 102400 логічних комірок.

**Висновки.** Таким чином у роботі розглянуто нелінійні математичні моделі для дослідження течій у системах транспорту нафти і нафтопродуктів. На основі цих моделей розроблено алгоритм автоматизованого розв'язання нелінійної задачі виявлення місця витоків за різного числа вимірів тисків на магістральній ділянці трубопроводу. Розроблена структура електронної системи виявлення витоків мовою Verilog HDL. Система складається з чотирьох основних незалежних модулів. Дизайн реалізований на ПЛІС Spartan 7 від компанії Xilinx, яка може містити в собі до 102400 логічних комірок.

## Література

- [1] Кудінов А. С. Розслідування крадіжок нафти та нафтопродуктів із магістральних трубопроводів / А. С. Кудінов ; за заг. ред. к. ю.н., доц. В. В. Коваленка / МБС України, Луган. держ. ун-т внутр. Справ ім. Е. О. Дідоренка. – Sumy : RVV LDUVS im. E. O. Didorenka, 2015. – 215 с.
- [2] Zhang, Q. Modeling Study on Fluid Flow in Horizontal Perforated Pipes with Wall Influx /Q. Zhang, Z. Wang // International Journal of Fluid Mechanics Research. – 2014. – Vol. 41, Iss. 6. – pp. 556–566.
- [3] Muthu, P. Mathematical model of flow in renal tubules / P. Muthu, T. Berhane // International Journal of Applied Mathematics and Mechanics. – 2010. – Vol. 6, no. 20. – pp. 94–107.
- [4] Х. М. Гамзаев Обратная задача нестационарного течения несжимаемой жидкости в трубе с проницаемой стенкой, Вестн. Южно-Ур. ун-та. Сер. Матем. Мех. Физ., 2020, том 12, выпуск 1, 24–30. DOI: <https://doi.org/10.14529/mmph200103>
- [5] Al-Shidhani, I. & Beck, S. & Staszewski, Wieslaw. (2003). Leak Monitoring in Pipeline Networks Using Wavelet Analysis. Key Engineering Materials - KEY ENG MAT. 245-246. 51-58. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.245-246.51>.
- [6] Li, Y, Sun, L, Jin, S, Wang, L, & Tan, D. Long Range Hot Oil Pipeline Leak Detection and Location Technique Based on Negative Pressure Wave. Proceedings of the 2006 International Pipeline Conference. Volume 2: Integrity Management; Poster Session; Student Paper Competition. Calgary, Alberta, Canada. September 25–29, 2006. pp. 963-968. DOI: <https://doi.org/10.1115/IPC2006-10471>
- [7] Chen, S, Sun, Y, Wang, L, Chen, P, & Tan, D. Development on Dynamic Pressure Monitoring Method and Sensor for Long Pipeline Leak Detection. Proceedings of the 2008 7th International Pipeline Conference. 2008 7th International Pipeline Conference, Volume 1. Calgary, Alberta, Canada. September 29–October 3, 2008. pp. 457-459. DOI: <https://doi.org/10.1115/IPC2008-64010>
- [8] C.J.W.Y. Thiberville, P.. Waltrich, W.C. Williams, S.I Kam Evaluation of Software-Based Early Leak-Warning System in Gulf of Mexico Subsea Flowlines SPE Production & Operations, 33 (04) (2018), pp. 802-828, DOI: <https://doi.org/10.2118/187417>
- [9] Оби́та А. Ф., Шлу́гай В. В. Внутрішні засоби виявлення витоків лінійної ділянки трубопроводу// Інформаційно-вимірювальні технології. (IBT-2022): Матеріали міжнародної науково-практичної конференції (Львів, 09-10 листопада 2022 р.). – 2022. – С. 96.

## Diagnostics of oil product leakage detection in main oil pipelines

Anatoliy Obshta, Oleksandr Shkurgan

*The problems of detecting oil product leaks and the principles of developing mathematical models of leakage localisation and estimates of the volume of leakage occurring as a result of unauthorised interference with the pipeline operation are considered. An analysis of physical and mathematical methods for detecting leaks in pipe transport networks is carried out. The nonlinear mathematical models of the control system for detecting oil product leaks along the controlled section of the pipeline are analysed. The methodology for processing experimental data and presenting the obtained results to the problem of determining the location and volume of oil product leakage by the proposed leakage detection system is applied. The structure of the electronic leakage detection system is developed in Verilog HDL.*

Отримано 31.03.23