

# ОБҐРУНТУВАННЯ НОВИХ ДІАГНОСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ТРУБОПРОВІДНИХ СИСТЕМ

І.В. Рибіцький<sup>1</sup>, О.М. Карпаш<sup>2</sup>, В.Ю. Запека<sup>2</sup>, П.М. Райтер<sup>1</sup>, А.В. Яворський<sup>1</sup>, Н.І. Чабан<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.  
E-mail: [admin@nung.edu.ua](mailto:admin@nung.edu.ua)

<sup>2</sup>Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, E-mail: [info@hups.mil.gov.ua](mailto:info@hups.mil.gov.ua)

<sup>3</sup>Університет Короля Данила, 76018, м. Івано-Франківськ, вул. Євгена Коновальця, 35. E-mail: [university@ukd.edu.ua](mailto:university@ukd.edu.ua)

Однією з основних задач технічної діагностики трубопровідних систем є забезпечення їх надійного та водночас енергоефективного функціонування. У роботі здійснено пошук та розроблення основ для побудови математичних моделей нових інформативних параметрів діагностики технічного стану та ефективності роботи трубопровідних систем. Показано, що пропускна здатність трубопроводу зменшується при набутті еліптичної конфігурації її перерізу. Обґрунтовано, що наявність малих витоків у трубопровідних системах спричиняє втрату стійкості течії в трубопроводі, виникнення зон турбулентної течії, внаслідок чого зменшується ефективність роботи трубопроводу. Бібліогр. 11, рис. 3.

*Ключові слова:* технічна діагностика, інформативні параметри, енергоефективність, трубопровідні системи, математична модель

**Вступ.** Технічний стан трубопровідної системи транспортування нафти, газу та нафтопродуктів, дотримання параметрів їх експлуатації у встановлених межах та ефективності роботи системи трубопроводів в цілому безпосередньо впливають на безперебійне та надійне постачання вуглеводнів споживачам.

Проблематика, яка пропонується до вирішення в даній роботі, полягає в спробі виявити нові діагностичні параметри, а також у розробці основ для побудови математичних моделей та методик для оцінки впливу змін цих параметрів на технічний стан та енергоефективність трубопровідних систем. До таких параметрів, які пропонується використовувати, можна віднести: геометричні параметри (товщина стінки, діаметр і форма поперечного перерізу трубопроводу), фізико-хімічні параметри транспортованого продукту (в'язкість, густина, температура), гідродинамічні параметри (тиск, швидкість течії, об'ємна витрата) і параметри, пов'язані з дефектами (витоки, тріщини, деформації, корозійні чи ерозійні пошкодження).

До параметрів, які змінюються мало, але при цьому впливають на ефективність роботи трубопровідних систем, слід віднести малі витоки, зміну фізико-хімічних характеристик продуктів, що транспортуються, а також зміну геометрії поперечного перерізу трубопроводу – його овалізацію або зменшення внутрішнього радіусу внаслідок відкладання важких домішок та конденсату в порожнині трубопроводу [1].

Дефекти такого роду визначаються експериментальними методами, проте дедалі більшого значення набуває використання методів математичного моделювання явищ такого характеру, зокрема, через складність реалізації апаратних засобів, що пов'язано з важкодоступністю поверхонь для реалізації контактних методів дослідження та значним обсягом необхідних робіт.

Окрім того, однією з основних задач технічної діагностики трубопровідних систем є забезпечення їх надійного та водночас енергоефективного функціонування. Таким чином, пошук нових інформативних параметрів діагностики технічного стану та ефективності роботи трубопровідних систем із розробленням відповідних математичних моделей є актуальною задачею.

**Методика досліджень.** Задача технічної діагностики та енергоефективності роботи трубопровідних систем може бути зведена до задачі моделювання течії вуглеводнів у трубопроводі з наявними змінами форми його поперечного перерізу, наявністю відкладень на внутрішній поверхні трубопроводу, витоками продукту та зміною фізико-хімічних характеристик самого продукту, що транспортується, для розроблення методик та ідентифікації дефектів, виявлення нових інформативних параметрів та меж застосування моделей. При дослідженні технічного стану складних систем, що тривалий час експлуатуються, зокрема, в задачах їх технічної діагностики, часто зустрічаються випадки, коли виникнення аварійних ситуа-

І.В. Рибіцький – <https://orcid.org/0000-0003-3596-3918>, О.М. Карпаш – <https://orcid.org/0000-0002-9240-1623>,  
В.Ю. Запека – <https://orcid.org/0000-0003-3143-6600>, П.М. Райтер – <https://orcid.org/0000-0002-3437-2844>,  
А.В. Яворський – <https://orcid.org/0000-0002-5970-4286>, Н.І. Чабан – <https://orcid.org/0009-0009-5839-5328>  
© І.В. Рибіцький, О.М. Карпаш, В.Ю. Запека, П.М. Райтер, А.В. Яворський, Н.І. Чабан, 2025

цій обумовлене наявністю малих збурень та змін, що діють на систему [2].

Розглянемо задачу оцінки впливу зміни геометричних характеристик перерізу трубопроводу та властивостей речовини, що транспортується, на технічний стан та енергоефективність трубопроводної системи. У допущенні, що труба має круглий поперечний переріз, а рідина (нафта чи нафтопродукти) рухається під дією сталого перепаду тиску по довжині труби, профіль швидкості визначається за формулою Пуазейля [3, 4]:

$$w = \frac{i}{4\mu}(a^2 - r^2) \quad (1)$$

де  $w$  – повздовжня швидкість течії в'язкої рідини;  $\mu$  – в'язкість рідини;  $a$  – радіус труби, в якій тече рідина;  $i$  – питомий перепад тиску на одиницю довжини труби;  $r$  – радіальна координата. При цьому профіль швидкості рідини являє собою параболоїд обертання.

Обчислена за (1) об'ємна витрата рідини визначається за формулою:

$$Q = \int_0^a w 2\pi r dr = \frac{i\pi a^4}{8\mu}, \quad (2)$$

при цьому слід зазначити, що об'ємна витрата значно залежить від радіусу труби і є пропорційною четвертому ступеню її радіуса. Аналізуючи (1) і (2), можна зробити наступні висновки: при зміні радіусу труби, який може мати місце при відкладенні осадів на її внутрішній стінці, як було зазначено в [1], найбільше на неї реагує об'ємна витрата. Нехай  $a_1$  – проектний радіус трубопроводу,  $a_2$  – радіус після його тривалої експлуатації,  $a_1 > a_2$ , тоді в кожній точці  $r = r_1$  перепад швидкості  $\Delta w$  буде дорівнювати:

$$\Delta w = \frac{i}{4\mu}(a_1^2 - a_2^2) \quad (3)$$

При цьому виникає дефіцит в пропускній здатності, яка може бути оцінена з використанням (2) наступним чином:

$$\Delta Q = \frac{i\pi}{8\mu}(a_1^4 - a_2^4). \quad (3)$$

Перетворенням (3) значення  $\Delta Q$  можна подати у вигляді:

$$\Delta Q \approx \frac{i\pi}{8\mu} \cdot 4R^3 \Delta\delta, \quad (4)$$

де  $\Delta\delta$  – зміна радіусу поперечного перерізу.

Для компенсації такої недостачі рідини, що транспортується, необхідно збільшити відносний перепад тиску, який може бути визначений зі співвідношення:

$$i_1 = \frac{i(R - 4\Delta\delta) \cdot R^3}{(R - \Delta\delta)^4}. \quad (5)$$

Очевидно, що  $i_1 > i$ . При цьому слід зазначити, що збільшення перепаду тиску зменшує енергоефективність роботи трубопроводної системи.

Іншим важливим моментом і можливим інформативним параметром є в'язкість речовини, що транспортується. Якщо в початковий момент часу динамічна в'язкість рідини складає  $\mu_1$ , а в певний момент часу вона зростає до значення  $\mu_2$ , то з урахуванням (1) і (2) отримаємо:

$$\begin{aligned} \Delta w &= \frac{i}{4\mu_1}(a^2 - r^2) - \frac{i}{4\mu_2}(a^2 - r^2) = \\ &= \frac{i}{4} \cdot \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2\mu_1}(a^2 - r^2), \end{aligned} \quad (6)$$

$$\Delta Q = \frac{i\pi a^4}{8\mu_1} - \frac{i\pi a^4}{8\mu_2} = \frac{i\pi a^4}{8} \cdot \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2\mu_1}. \quad (7)$$

Для компенсації цієї неоднозначності продукту по аналогії з (5) можна отримати необхідне для компенсації недостачі значення певного перепаду тиску:

$$\frac{i_1\pi a^4}{8\mu_2} = \frac{i\pi a^4}{8\mu_1} - \frac{i\pi a^4}{8} \cdot \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2\mu_1}, \quad (8)$$

$$\frac{i_1}{\mu_2} = \frac{i}{\mu_1} - i \cdot \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_2\mu_1}. \quad (9)$$

$$\frac{i_1}{\mu_2} = \frac{i(\mu_2 - \mu_2 + \mu_1)}{\mu_2\mu_1} = \frac{i}{\mu_1}. \quad (10)$$

Остаточно після проведення перетворення отримуємо:

$$i_1 = i \frac{\mu_2}{\mu_1}. \quad (11)$$

Очевидно, що  $i_1 > i$ , бо  $\mu_2/\mu_1 > 1$ . Знову ж таки, як бачимо з вищеведеного, підвищення перепаду тиску по довжині трубопроводу веде до зменшення енергетичної ефективності трубопроводної системи.

Окрім того, аналізуючи рівняння (1) і (2) та здійснивши деякі перетворення, можна одержати узагальнену формулу для перепаду швидкості:

$$\Delta w = \frac{a^2 - r^2}{4\mu} \delta i - \frac{i}{4\mu^2}(a^2 - r^2) \delta\mu + \frac{i}{4\mu} 2a\delta a \quad (12)$$

де  $\delta a$ ,  $\delta i$ ,  $\delta\mu$  – варіації відповідних величин.

Аналогічно можемо отримати узагальнене рівняння для дефіциту пропускної здатності:

$$\Delta Q = \frac{\pi a^4}{8\mu} \delta i - \frac{i\pi a^4}{8\mu^2} \delta\mu + \frac{i\pi 4a^3}{8\mu} \delta a \quad (13)$$

Формули (12) і (13) дозволяють оцінювати недостатню кількість (об'єм) протікання вуглеводнів у тих випадках, коли однозначно визначаються недостатній відносний перепад тиску та зміна геометрії перерізу трубопроводу внаслідок відкладення технологічних речовин на його стінках і зміни в'язкості рідини.

Також часто зустрічаються випадки коли, при дослідженні реальної геометрії трубопроводних систем виявляється, що переріз трубопроводу набуває форму еліпса. Це обумовлюється дією рідинно-силових факторів (дія згинального моменту при зсувах, технологічні дефекти), що веде до виникнення додаткових напружень у матеріалі трубопроводу і може призвести до руйнування окремих його ділянок.

Аналізуючи задачу течії рідини по трубі, що в перерізі має форму еліпса, можна прийти до висновку, що формули (1) і (2) можуть бути записані у наступному вигляді [3].

Для профілю швидкості:

$$w(y, z) = A \left( 1 - \frac{y^2}{a^2} - \frac{z^2}{b^2} \right), \quad (14)$$

$$A = \frac{i}{2\mu} \frac{a^2 b^2}{a^2 + b^2}. \quad (15)$$

Для об'ємної витрати:

$$Q = \iint_G w \, dy \, dz = \frac{\pi i}{4\mu} \frac{a^3 b^3}{a^2 + b^2}, \quad (16)$$

де константи  $a$  (велика піввісь) та  $b$  (мала піввісь) кривої еліпса  $\frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} = 1$ , який моделює деформований переріз.

Розглянемо функцію:

$$f(x, y) = \frac{x^3 y^3}{x^2 + y^2} \quad (17)$$

як функцію двох змінних і проведемо її дослідження на екстремум. Із системи рівнянь (18) можна показати, що вказана функція має критичні точки:  $x = 0$ ;  $y = 0$ ;  $x = -y$ ;  $x = y$ :

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial x} = 0 = -\frac{x^3 y^3 \cdot 2x}{(x^2 + y^2)^2} + \frac{3x^2 y^3}{x^2 + y^2} = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial y} = 0 = -\frac{x^3 y^3 \cdot 2y}{(x^2 + y^2)^2} + \frac{3x^3 y^2}{x^2 + y^2} = 0 \end{cases}, \quad (18)$$

Очевидно, що перші три умови не відповідають фізичним умовам задачі. Отже, функція має окремий екстремум, який досягається при  $x = y$  ( $x, y, z$  – координати досліджуваної ділянки трубопроводу: поздовжня, поперечна горизонтальна та поперечна вертикальна координата відповідно). Ця умова оз-

начає, що функція (17) у такому випадку набирає екстремального значення. Провівши відповідні математичні перетворення, можна довести, що це головний екстремум, тобто максимум функції.

З практичної точки зору це означає, що пропускна здатність трубопроводу зменшується при набутті еліптичної конфігурації її перерізу, що веде до необхідності підвищення відносного перепаду тиску та призводить до зниження енергоефективності трубопроводної системи [5].

Наступний діагностичний параметр можна отримати при детальному розгляді течії в'язкої рідини в трубопроводах, що містять дефекти стінки труби, зокрема наскрізні отвори, крізь які відбувається відтік продукту. У даному випадку задача технічної діагностики може бути представлена у вигляді задачі моделювання течії з витоками [6].

Дослідження стійкості гідродинамічних процесів у зоні малих витоків є важливим з двох аспектів, що впливають на енергоефективність: оцінка величини втрати вуглеводнів, що транспортуються; вивчення структури течії за наявності малих витоків різної інтенсивності з точки зору виникнення зон турбулентної течії, що може призводити до фактичного зменшення ефективного діаметру трубопроводу [7].

Проведемо математичне моделювання течії технологічної рідини в трубопроводі за наявності витоків різної величини крізь стінку трубопроводу. Для здійснення цього чисельно інтегрується система рівнянь Нав'є-Стокса, досліджуються параметри стійкості чисельних схем, вибираються інформативні параметри для визначення зон впливу витоку та встановлюються межі використання моделі до переходу течії в турбулентний режим.

Течія продуктів у трубопроводах може бути описана з використанням системи рівнянь Нав'є-Стокса, записаної у циліндричній системі координат [8], проте є одна особливість трубопроводних систем з точки зору їх геометрії, зокрема симетричність течії. Локальний характер зони малих витоків дозволяє знизити розмірність задачі та, зокрема, вважати, що розглядається двовимірне течія в'язкої рідини в каналі зі стінкою, в якій присутній витік рідини через поверхню, у припущенні, що течія є стаціонарною. Дане припущення справедливе й зокрема для квазістаціонарних процесів, коли вважається, що характеристики модельованої течії мало змінюються з часом (рис. 1).

У такому випадку система рівнянь Нав'є-Стокса записується у двовимірній області наступним чином:

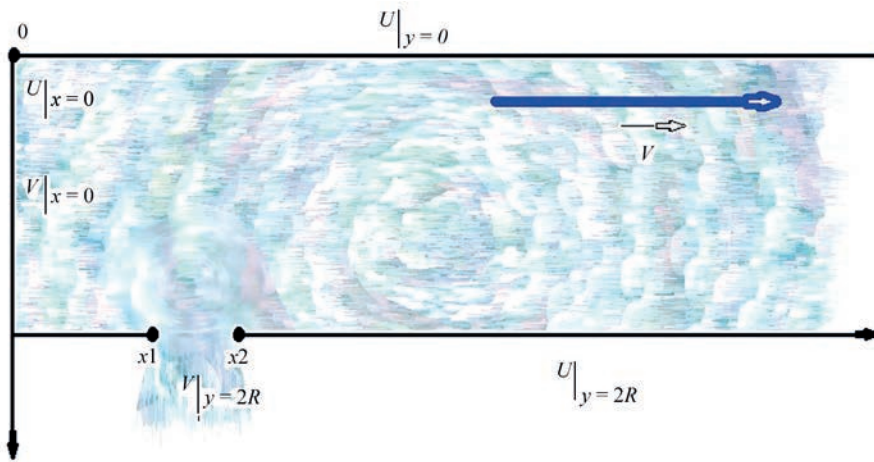


Рис. 1. Схема течії у двовимірному каналі з витоками

$$\begin{cases} U \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + V \cdot \frac{\partial U}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) \\ U \cdot \frac{\partial V}{\partial x} + V \cdot \frac{\partial V}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \cdot \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) \\ \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \end{cases} \quad (19)$$

де  $U$  і  $V$  – компоненти вектору швидкості в прямокутній декартовій системі координат;  $\rho$  – густина продуктів, що транспортуються;  $\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості;  $p$  – тиск рідин.

Граничні умови задаються у вигляді:

$$\begin{cases} U|_{x=0} = -\frac{k \cdot y^2}{4 \cdot \mu} + \frac{k \cdot R_y}{2 \cdot \mu} \\ U|_{y=0} = U|_{y=2R} = 0 \\ V|_{x=0} = V|_{y=0} = 0 \\ V|_{y=2R} = \begin{cases} 0 & x < x_1, x < x_2 \\ V_{leak} & x \in [x_1; x_2] \end{cases} \end{cases} \quad (20)$$

де  $[x_1; x_2]$  – зона витоку;  $\mu$  – динамічна в'язкість продуктів, що транспортуються;  $R$  – радіус каналу. Для компоненти швидкості  $U|_{x=0}$  вважається, що вона обчислюється як у відомій моделі Пуазейля [9], яка описує стаціонарну течію в'язкої рідини в трубі круглого поперечного перерізу.  $V_{leak}$  – швидкість витоку рідини через область. Граничні умови (20) можуть бути іншими в залежності від того, як розташовані зони витоку рідини – якщо вони розташовані на різних границях каналу, то для компоненти швидкості  $V$  ненульовими будуть значення швидкості на певних відрізках як при  $y = 0$ , так і при  $y = 2R$ . Методика розв'язання вказаної задачі є відомою [9], особливістю при її розв'язанні є наявність розривних граничних умов (20) та відсутність коректних граничних умов для тиску.

Диференціюючи перше з рівнянь системи (19) по змінній  $x$ , а друге – по змінній  $y$  та беручи до уваги третє рівняння системи (19), одержимо рівняння Пуассона для визначення тиску:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = -2 \cdot \rho \left( \frac{\partial V}{\partial x} \cdot \frac{\partial U}{\partial y} - \frac{\partial U}{\partial x} \cdot \frac{\partial V}{\partial y} \right) \quad (21)$$

Подальша схема розв'язку є наступною:

- а) задається деяке початкове наближення тиску  $p_0(x, y)$ ;
- б) за даним розподілом  $p_0(x, y)$  розв'язується система (19) з граничними умовами (20);
- в) після знаходження компонент швидкості  $U$  і  $V$  обчислюються праві частини рівняння (21);
- г) рівняння (21) розв'язується з граничними умовами:

$$p|_{\partial G} = P_0(x, y) \quad (22)$$

- д) після одержання нового розподілу тиску вказаний алгоритм повертається до пункту (а).

До досягнення збіжності ітераційного процесу необхідно дану процедуру повторювати. Система (19) з граничними умовами (20) розв'язується з використанням абсолютно збіжних неявних схем методу змінних напрямків [10], а рівняння (21) – методом послідовної верхньої релаксації. Збіжність і стійкість вказаного ітераційного методу доведено в [11].

Початкове наближення розподілу тиску вибиралось при допущенні про те, що існує лінійний перепад тиску по довжині каналу, яким моделюється труба з витоком:

$$p = p_0 - k \cdot x \quad (23)$$

Використовуючи рівняння (23) для розрахунку поля швидкостей, можна встановити залежності між інтенсивністю витоку і зміною конфігурації течії.

Моделювання течії в трубопроводі з дефектами, через які відбувається відтік рідини, проводиться для наступних параметрів течії, геометрії

труби, властивостей рідин і газів, лінійного перепаду тиску по довжині труби: середня швидкість рідини в трубопроводі – 2..8 м/с; характерна швидкість малого витоку – до 50 см/с; динамічна в'язкість рідини – 0,001 кг/м·с; кінематична в'язкість – 0,000001 м<sup>2</sup>/с; характеристика перепаду тиску  $K = 0,064...0,096$ ; крок за повздовжньою координатою – 0,08 м; крок за поперечною координатою – 0,025 м, що відповідає трубопроводу діаметром 1,25 м при 50-ти контрольних точках за поперечною координатою; кількість кроків за повздовжньою координатою – 90000, що дозволяє провести розрахунок поля швидкостей для труби завдовжки 7,2 км з кроком 8 см.

Аналізуючи поведінку поздовжньої компоненти швидкості в пристінковій зоні, можна відмітити закономірність, яка залежить від швидкості витоку: чим більша швидкість витоку, тим скоріше відбувається порушення монотонності поля швидкостей на стороні витоку (рис. 2). Крім того, виявлено наступну закономірність: порушення монотонності, яке може бути визначене як різниця швидкості у двох точках сітки, що знаходяться найближче до стінки:

$$\Delta V_m = V(N) - V(N - 1), \quad (24)$$

де  $N + 1$  – кількість точок розрахункової сітки за поперечною координатою.

Порушення монотонності поля швидкостей відбувається за наступною закономірністю: спочатку відбувається перше порушення монотонності, потім монотонність відновлюється та наступна її втрата веде до втрати стійкості обчислювальним процесом, що схематично зображено на рис. 2.

Точки  $L_3$  і  $L_1$  можуть слугувати реакцією течії на мале збурення, вони відповідають мінімальній відстані, на якій дія збурення вже відчутна, а точки  $L_4$  і  $L_2$  – це точки втрат стійкості різницевої схеми. У

такому випадку точки  $L_3$  і  $L_1$  можуть слугувати діагностичною ознакою, а  $L_4$  і  $L_2$  – ні, причому зміст процесів, що відбуваються після цих точок, може бути наступним: або втрачається стійкість обчислювальної процедури, або ж змінюється фізична картина течії, тобто з ламінарного вона переходить у турбулентний режим і для подальшого опису течії необхідно використовувати інші моделі. З технічної точки зору така поведінка знаходить пояснення у факті того, що при сповільненні рідини по довжині труби необхідно підкачувати її для забезпечення певного тиску, швидкості течії та відповідно заданих об'ємів постачання. Це призводить до зниження енергоефективності трубопровідної системи. Важливим результатом, який наводиться на рис. 2, є те, що при певних значеннях швидкості витоку ( $V = 0,05$ ) втрати монотонності швидкості взагалі не відбувається, тобто течія залишається стійкою до такого збурення швидкості. Отже, чим більша швидкість витоку, тим швидше потік реагує на неї зміною монотонності швидкості в пристінковій зоні.

Провівши відповідні розрахунки, можна показати, що при значеннях швидкостей витоку ( $V = 0,05...0,15$ ) течія зберігає стійкість, тобто має місце як стійкість гідродинамічного процесу так і стійкість чисельної схеми. Проте при зростанні швидкості витоку картина розподілу градієнта повздовжньої компоненти швидкості в пристіночній зоні при різних швидкостях витоку набуває іншого характеру. Зокрема стійкість течії втрачається, що можна пояснити виникненням турбулентних ефектів течії та можливою втратою стійкості різницевого методу.

Розроблена модель та чисельна схема її реалізації може бути використана при діагностуванні малих витоків, які розташовані на певній відстані один від одного.

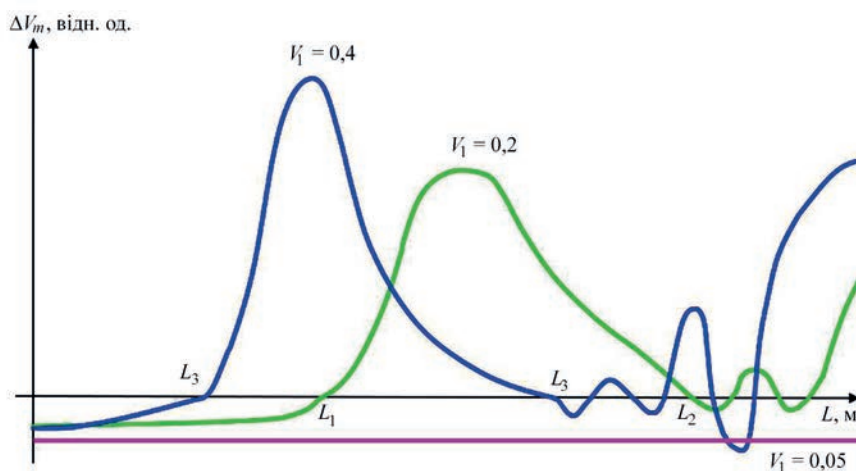


Рис. 2. Залежність між поздовжньою компонентою швидкості  $\Delta V_m$  та відстанню від дефекту при різних модельних значеннях швидкості витоку, наведеною в умовних одиницях

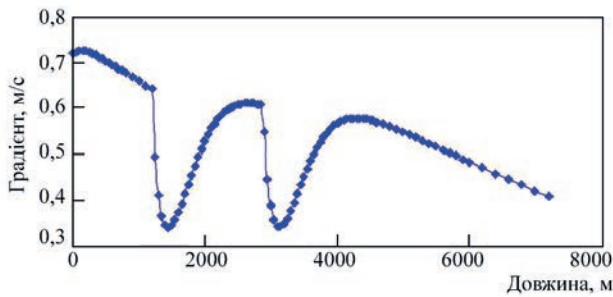


Рис. 3. Залежність між градієнтом поздовжньої компоненти швидкості та наявністю витоку, розміщених на відстані, витоку різної інтенсивності, координати витоку  $x = 1,2$  та  $x = 2,88$  км

За результатами чисельного моделювання течії рідини по каналу з її витоками через поверхню встановлено спосіб оцінки координати точки витоку та її залежність від швидкості витоку. Підтверджено, що задачі технічної діагностики систем різного призначення з математичної точки зору є задачами дослідження стійкості відповідних процесів і чисельних схем реалізації моделей таких процесів.

**Висновки**

У результаті проведених досліджень було запропоновано враховувати нові інформативні параметри (геометричні, фізико-хімічні, гідродинамічні, дефектоскопічні) при оцінці фактичного технічного стану та ефективності роботи трубопровідних систем, а саме:

1. Зміна поперечного перерізу трубопровідної системи за рахунок відкладень технологічних речовин, зміни динамічної в'язкості речовини, що транспортується, та питомого перепаду тиску веде до виникнення додаткових напружень у матеріалі трубопроводу та навіть набуття перерізом трубопровідної системи еліптичної конфігурації, що може призвести до руйнування окремих ділянок трубопроводу.

2. Наявність малих витоку в стінці трубопроводу, які утворюються внаслідок корозії, дефектів матеріалу, механічних пошкоджень призводить як до втрати продуктів, що транспортуються, так і до втрати стійкості течії в трубопроводі, виникнення зон турбулентної (нестійкої) течії, внаслідок чого виникає загроза ерозійного зношування стінки трубопроводу та виникнення додаткових напружень у матеріалі трубопроводу. У цьому випадку може бути вирішена й обернена задача – розроблена модель течії рідини в трубопроводі та чисельна схема її реалізації можуть бути використані при діагностуванні малих витоку, які розташовані на певній відстані один від одного.

3. Значення питомого перепаду тиску. Підвищення питомого перепаду тиску обумовлює зменшення енергетичної ефективності системи, зни-

ження свідчить про недопдачу транспортованого продукту. Обидва ці фактори призводять до порушення штатного режиму роботи трубопроводу, а, відповідно, і до виникнення зміни фізико-механічних характеристик у матеріалі трубопроводу.

Подальші дослідження необхідно спрямувати на вдосконалення методів виявлення малих витоку, розробку нових підходів до моніторингу стану трубопроводів у реальному часі та інтеграцію математичних моделей у системи автоматизованого управління трубопровідними системами. Це дозволить забезпечити точнішу оцінку технічного стану трубопровідних систем та запобігти значним енергетичним втратам.

**Список літератури/References**

- Rybityskiy, I.V., Oliynyk, A.P., Yavorskiy, A.V. et al. (2019) Impact assessment of non-technological fluid accumulations in the cavity of an existing gas pipeline on the energy efficiency of its operation. *Physics and Chemistry of Solid State*, 20(4), 457–466. DOI: <https://doi.org/10.15330/pcss.20.4.457-466>
- Doroshenko, Y., Rybityskiy, I. (2020) Investigation of the influence of the gas pipeline tee geometry on hydraulic energy loss of gas pipeline systems. *Eastern-European J. of Enterprise Technologies*, 1(8(103)), 28–34. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.192828>
- Konstantinov, Yu.M., Gizha, O.O. (2002) *Technical mechanics of fluids and gas: Manual*. Kyiv, Vyscha Shkola [in Ukrainian].
- Koichi Nakabayashi, Osami Kitoh, Voshitaka Katoh (2004) Similarity laws of velocity profiles and turbulence characteristics of Couette–Poiseuille turbulent flows. *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 507, Published online by Cambridge University Press, 25 May 2004, 43–69. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112004008110>
- Dickerson, P., Worthen, J. (2024) Optimizing pipeline systems for greater precision, efficiency & safety using emerging technologies. In: *PSIG Annual Meeting*, Charleston, South Carolina, 7–10 May 2024. PSIG-2426.
- Larson, R.G. (1992) Instabilities in viscoelastic flows. *Rheol. Acta*, 31, 213–263. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00366504>
- Frigaard, I.A., Howison, S.D., Sobey, I.J. (1994) On the stability of Poiseuille flow of a Bingham fluids. *J. Fluid Mechanics*, Vol. 263, Published online by Cambridge University Press, 26 April 2006, 133–150. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112094004052>
- Dubrulle, B., Laval, J.-P., Nazarenko, S., Zaboronski, O. (2004) A model for rapid stochastic distortions of small-scale turbulence. *J. of Fluid Mechanics*, Vol. 520, Published online by Cambridge University Press, 29 November 2004, 1–21. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0022112004001417>
- Zeytounian, R.K., Platzer, M.F. (2004) Theory and applications of viscous fluid flows. *Applied Mechanics Reviews*, 57(3), B15–B16. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.1760521>
- Олійник А.П., Штаєр Л.О. (2012) Дослідження впливу параметрів релаксації на збіжність чисельного методу послідовної верхньої релаксації для задачі Діріхле. *Карпатські математичні публікації*, 4(2), 289–296.
- Oliynyk, A.P., Shtaiar, L.O. (2012) Investigation of the influence of relaxation parameters on the convergence of the numerical method of sequential upper relaxation for the Dirichlet problem. *Carpathian Mathematical Publications*, 4(2), 289–296 [in Ukrainian].
- Bennequin, D., Gander, M.J., Gouarin, L., Halpern, L. (2016) Optimized Schwarz waveform relaxation for advection reaction diffusion equations in two dimensions. *Numer. Math.*, 134(3), 513–567. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00211-015-0784-8>

## SUBSTANTIATION OF NEW DIAGNOSTIC PARAMETERS OF PIPELINE SYSTEMS EFFICIENCY

I.V. Rybitskyi<sup>1</sup>, O.M. Karpash<sup>2</sup>, V.Yu. Zapeka<sup>2</sup>, P.M. Raiter<sup>1</sup>, A.V. Yavorskyi<sup>1</sup>, N.I. Chaban<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. 15 Karpatska Str., 76019, Ivano-Frankivsk, Ukraine.

E-mail: admin@nung.edu.ua

<sup>2</sup>Kharkiv Ivan Kozhedub National University of the Air Force. Ukraine. E-mail: info@hups.mil.gov.ua

<sup>3</sup>King Danylo University. 35 E. Konovaltsia Str., 76018, Ivano-Frankivsk, Ukraine. E-mail: university@ukd.edu.ua

One of the main tasks of technical diagnostics of pipeline systems is to ensure their reliable and at the same time energy-efficient operation. In this work, we have searched for and developed the basis for constructing mathematical models of new informative parameters for diagnosing the technical condition and efficiency of pipeline systems. It is shown that the capacity of a pipeline decreases when it acquires an elliptical cross-sectional configuration. It is substantiated that the presence of small leaks in pipeline systems causes a loss of flow stability in the pipeline, the emergence of turbulent flow zones, which reduces the efficiency of the pipeline. 11 Ref., 3 Fig.

*Keywords: technical diagnostics, informative parameters, energy efficiency, pipeline systems, mathematical model*

Отримано 26.11.2024

Отримано у переглянутому вигляді 24.12.2024

Прийнято 10.03.2025



### Українське матеріалознавче товариство ім. І.М. Францевича

Українське матеріалознавче товариство (УМТ) є громадською організацією, яка об'єднує матеріалознавців України для сприяння розвитку матеріалознавчої галузі в Україні. Засноване у 2004 році, УМТ активно працює над покращенням координації діяльності матеріалознавців, створенням умов для взаємодії науковців з виробничим сектором, залученням молоді до матеріалознавчої науки та інших спільних дій, спрямованих на науковий та виробничий розвиток матеріалознавства в Україні.

#### Діяльність Товариства:

1. Організація наукових конференцій та семінарів. УМТ регулярно проводить наукові заходи, такі як International Materials Science Conference HighMatTech та International Samsonov Conference "Materials Science of Refractory Compounds", які збирають науковців-матеріалознавців з різних країн для обміну досвідом та ідеями.
2. Залучення молоді до матеріалознавчої науки. Товариство на регулярній основі проводить конкурси студентських наукових робіт.
3. Підвищення престижу матеріалознавчої науки. УМТ щороку на конкурсній основі відзначає науковців нагородами за видатні досягнення в галузі матеріалознавства.
4. Взаємодія з бізнесом та промисловістю. УМТ організовує тематичні науково-виробничі семінари з залученням науковців та представників промисловості та бізнесу.
5. Розроблення сучасної матеріалознавчої термінології. УМТ займається розробкою сучасної термінології у галузі матеріалознавства, що сприяє стандартизації та покращенню комунікації в науковій спільноті.
6. Навчальні ініціативи. У 2025 році УМТ започаткувало серію навчальних семінарів з підготовки наукових публікацій для молодих науковців.
7. Інформаційна підтримка членів Товариства. УМТ надає інформаційну підтримку членам товариства шляхом розсилання інформації про актуальні матеріалознавчі події в Україні та світі.

#### Переваги для учасників Українського матеріалознавчого товариства ім. І.М. Францевича:

- Доступ до платформи взаємодії.
- Участь у заходах товариства зі знижками або на безоплатній основі.
- Інформаційна підтримка.
- Підтримка у разі організації власних ініціатив.

#### Переваги для організацій-спонсорів:

- Інформаційна підтримка.
- Доступ до широкого кола контактів у матеріалознавчій спільноті.
- Можливість участі у заходах товариства зі знижками.

[www.umrs.org.ua](http://www.umrs.org.ua)