



**Розділ сформований за матеріалами Міжнародної
науково-технічної конференції**

**«ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ
ТРАНСПОРТУВАННЯ
ТА ЗБЕРІГАННЯ ЕНЕРГОНОСІЇВ»**

**(присвяченої 60-літтю кафедри
транспортування та зберігання
енергоносіїв)**

**3-4 липня 2025 р.
(Івано-Франківськ – Яремче)**

Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

УДК 621.51.004

DOI: 10.31471/2304-7399-2025-21(79)-263-271

ДЕТЕРМІНОВАНІ МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ РЕЖИМІВ ГАЗОТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

В. Я. Грудз , **Я. В. Грудз** , **В. В. Сміх** , **Р. В. Терещенко** ,
Н. Р. Терефенко 

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
тел. +38 (0342) 72-71-38; e-mail: volodymyr.hrudz@nunge.edu.ua

Розглядаються принципи дослідження нестационарних процесів у магістральних газопроводах за умов їх неповного завантаження, які ґрунтуються на використанні частотних методів аналізу динаміки потоків. Запропоновано підхід до побудови амплітудно-частотних характеристик системи при дії статичних і динамічних навантажень, що дозволяє оцінити реакцію газотранспортної системи на збурення різної частоти та амплітуди. Розглянуто умови, за яких частотний підхід може бути застосований для визначення основних параметрів перехідних процесів і вибору оптимальних режимів експлуатації газопроводів.

Метою роботи є розроблення методів раціонального планування режимів роботи газотранспортних систем на основі використання частотних характеристик за критерієм мінімальної тривалості нестационарного процесу. На основі аналітичних досліджень отримано рівняння, що встановлює залежність швидкості розповсюдження малих збурень у газовому потоці від лінійної координати при стаціонарному режимі. Проведений аналіз результатів розрахунків показав, що розбіжності між значеннями швидкості звуку, отриманими за різними методиками, становлять 2,1–5,8%, причому зменшення реальної швидкості поширення збурень тиску супроводжується зростанням різниці між результатами.

Отримані результати дозволяють удосконалити існуючі методи діагностування малих витоків із газопроводу на основі аналізу коливальних процесів і частотних характеристик. Запропоновано метод ви-

користання частотних підходів для оцінки імпедансу при розрахунках нестационарних процесів, визначення частотного діапазону роботи газопроводу та проведення спрощеного аналізу його режимів. Запропонований підхід може бути застосований у задачах чисельної реалізації операційних рівнянь, аналізу процесів неусталеного руху газу та розроблення методів статистичної динаміки газотранспортних систем. Отримані результати створюють підґрунтя для підвищення точності моделювання нестационарних процесів і вдосконалення систем діагностування магістральних газопроводів.

Ключові слова магістральний газопровід, нестационарний процес, ампліудно-частотна фазова характеристика.

Вступ

Методи аналізу роботи елементів газопостачання можна розділити на теоретичні (математичні), експериментальні і експериментально-теоретичні. Теоретичний аналіз може бути аналітичним або чисельним, таким, що проводиться за допомогою сучасних комп'ютерних систем.

У першому випадку ми отримуємо результати у вигляді формул, що дозволяють досить просто і наочно простежити залежність вихідних координат від початкових даних, структури системи і її параметрів. Проте іноді зв'язки настільки складні і важко простежуються, що для кожного випадку треба проводити розрахунок з урахуванням не лінійності, інерційності, змінності в часі параметрів. Аналітичні рівняння отримують шляхом теоретичного аналізу процесів тепло- і масопереносу, фізико-хімічних перетворень і т. д. Найбільші труднощі виникають при знаходженні чисельних значень коефіцієнтів отриманих рівнянь. Для цього необхідно заздалегідь знати геометрію елемента, швидкості руху, коефіцієнти теплопередачі і т. д. Критерієм правильності складених рівнянь є збіг з певною точністю їх чисельних рішень з експлуатаційними даними [1].

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Використовуються два методи математичного опису: перший ґрунтується на отриманні фізико-хімічних закономірностей, другий – на теоретичній можливості опису процесу за допомогою тих або інших формальних математичних виразів [1].

Перший метод ґрунтується на ретельному вивченні процесів тепло- і масопереносу в елементах систем газопередачі. Математичний опис в цьому випадку складається з рівнянь матеріального балансу, теплового балансу і т. д. Наприклад, в простому випадку рух газу по трубах описується рівнянням, в яке входить рівняння збереження кількості руху і рівнянням стану збереження маси [2, 3].

При другому методі для математичного опису використовуються емпіричні математичні залежності. Наприклад, для формули в'язкості

не ньютонівських рідин запропонований не один десяток емпіричних залежностей. Часто теорія подібності в чистому вигляді не застосована до процесів, що протікають в елементах газопередачі, наприклад до процесів в апаратах осушення газу сорбентами [4, 5, 6].

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

Формальні емпіричні закономірності, отримані для лабораторних установок, не можна без додаткових досліджень використати для розрахунку промислових установок. Математичний опис ґрунтується на фізико-хімічних закономірностях, адекватно технологічному процесу. Тому другий метод доцільно застосовувати за відсутності апріорної інформації про структуру системи і фізико-хімічні процеси, що протікають в ній, для оцінки меж використання аналітичних методів, а при великій складності аналітичного опису – для отримання простіших аналітичних виразів. Проблема визначення математичного опису в елементах систем транспорту газу в стаціонарному (статичні характеристики) і несталому (динамічні) режимах є проблемою ідентифікації характеристик елементів систем транспорту газу. Її рішення складається з вибору методу, виходячи з конкретних умов роботи елемента газопостачання і наявної апріорної інформації про його властивості; вибору умов роботи і дій на цей елемент, при яких слід знімати експериментальні дані; обробки експериментальних даних для визначення шуканих характеристик; оцінки точності.

Мета та завдання досліджень

Мета роботи полягає у розробці методів раціонального планування режимів роботи газотранспортних систем на основі використання частотних характеристик за критерієм мінімальної тривалості нестационарного процесу.

Дослідження

Принцип методики визначення статичних характеристик елементів газопостачання полягає в тому, що на вході елемента змінюють значення вхідної величини спочатку в зростаючому порядку (прямий хід), потім в спадаючому (зворотний хід), захоплюючи при цьому увесь робочий діапазон. Значення $x_{вх}$ і $x_{вих}$ для кожного елемента вимірюють і будують графік $x_{вих} = f(x_{вх})$, який і буде статичною характеристикою між цими величинами. За результатами експерименту встановлюють діапазон можливої роботи елемента, норму чутливості, відхилення від лінійності, розкид параметрів і т. д. При необхідності експеримент проводять декілька разів і результати обробляють методом найменших квадратів. Статичні характеристики можуть бути лінійними:

$$x_{вих} = a + k x_{вх}$$

Залежність між величинами $p_{вх}$ і Q^2 при $p_{вих} = \text{const}$ ділянки газопроводу є лінійною, оскільки $p_{вх}^2 - p_{вих}^2 = AQ^2$, звідси $p_{вх}^2 = AQ^2 + p_{вих}^2$. (рис. 1.)

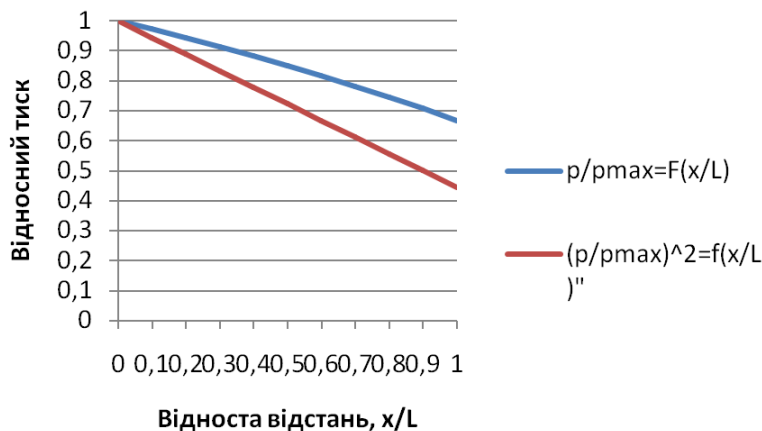


Рис. 1. Статистична характеристика ділянки газопроводу і її лінеаризація

При пасивному методі найчастіше доводиться застосовувати згладжування або статичну обробку результатів експериментів. Якщо дані експерименту розкидані, то згладжують отримані дані для пригнічення впливу випадкових перешкод. Найчастіше для цього використовують метод ковзаючого середнього і метод згладжування четвертими різницями. Для отриманої або згладженої характеристики прагнуть підібрати просту аналітичну залежність, користуючись графіками. Наприклад, маємо розташування точок, близьке до статичної функції $y = ax^b$. Замінюючи змінні і логарифмуючи її отримаємо $lg(y) = lg(a) + b \cdot lg(x)$, побудуємо графік. При цьому значення $lg(y)$ розташуються близько до прямої лінії. Те ж запишемо для n точок, і з одержаних рівнянь знаходимо a і b .

Якщо необхідно точніше розташувати шукану аналітичну залежність, використовують метод найменших квадратів. При великому числі точок його застосування трудомістке, тому використовують програми, що входять у бібліотеку стандартних програм.

Після виключення останньої складової величина функції y має бути близька до одиниці, що дає можливість судити про точність представленої моделі. Величини a_1, a_2 шукають методом регресійного аналізу. Цей метод ефективний при оцінці зв'язку місць видобутку і споживання газу. Цей підхід можна перенести на поліноми n -го порядку. Апроксимуючу функцію визначають у виді

$$y = a_1 + a_2 x_1 + a_3 x_1^2 + \dots + a_n x_1^n + b_1 + b_2 + b_2 x_2 + \dots \quad (1)$$

і повторюють описану вище процедуру. Іноді зв'язок між параметрами записують у виді

$$y = C f(x_1) f(x_2) f(x_3) \cdot \dots,$$

де

$$f(x_i) = a_0 + a_1 x_i + a_2 x_i^2 + \dots + a_m x_i^m.$$

Функції $f(x_i)$ знаходять у міру того, як виключається вплив кожного з параметрів x_i на змінну y . Спочатку визначають C – середнє значення y . Потім знаходять $y_1 = y/C$ і для y_1 і x_1 будують кореляційну таблицю і емпіричну лінію регресії, яка апроксимується за допомогою методу найменших квадратів. За коефіцієнтами $a_1, a_2, \dots, a_n$, знаходять функції і визначають регресійну залежність між величинами y_2 і x_2 і т. д.

Значення y_n має бути близьке до одиниці; якщо цього не відбувається, потрібний перерахунок з більшою точністю.

Цей підхід використовувався для отримання характеристик компресорних агрегатів статистичними методами.

Під динамічними характеристиками елементів газопостачання розуміють математичний опис елементів в окремому випадку нестационарних режимів (у перехідному режимі), задане у виді диференціального рівняння, або функцій частоти, що називаються частотними характеристиками.

Перехідною або тимчасовою характеристикою називають реакцію елементів системи газопостачання на стрибкоподібну зміну вхідної величини, наприклад тиску. Знаючи перехідну характеристику $h(k)$, можна визначити положення системи при будь-якій дії у будь-який момент часу

$$y(t) = z(0)h(t) + \int_0^t \frac{dx(\tau)}{d\tau} h(t-\tau) d\tau. \quad (2)$$

Якщо на вхід системи подати одиничну амплітудну дію, то така характеристика називається імпульсною перехідною. Вона є похідною від перехідної характеристики $g(t) = dh(t)/dt$. Інтеграл згортання в цьому випадку записується у виді:

$$y(t) = \int_0^t q(t)h(t-\tau) d\tau = \int_0^t g(t-\tau)h(\tau) d\tau. \quad (3)$$

За імпульсною характеристикою можна побудувати перехідну характеристику. Ця методика використана для задач еквівалентування рівнянь неусталеного руху газу.

Динамічні характеристики визначають з використанням частотних методів. Частотною характеристикою називається відношення вихідної величини до значень вхідної гармонійної дії, що розглядається як функція частоти вхідної дії. Якщо основні параметри системи не змінюються в часі, то амплітудно-фазова частотна характеристика є відношенням перетворення Фур'є вихідної величини до перетворення Фур'є вхідної дії:

$$\Phi(j\omega) = \frac{H(j\omega)}{F(j\omega)}. \quad (4)$$

Нехай система описується рівнянням

$$a_0 \frac{d^n x}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dx}{dt} + a_n x = b_0 \frac{d^m y}{dt^m} + \dots + b_{m-1} \frac{dy}{dt} + b_m y. \quad (5)$$

Застосовуючи перетворення Фур'є, отримуємо за нульових початкових умов:

$$\begin{aligned} a_0(j\omega)^n + a_1(j\omega)^{n-1} + \dots + a_{n-1}(j\omega) + a_n x(j\omega); \\ b_0(j\omega)^m + b_1(j\omega)^{m-1} + \dots + b_{m-1}(j\omega) + b_m x(j\omega). \end{aligned} \quad (6)$$

Тоді відношення

$$\frac{y(j\omega)}{x(j\omega)} = \frac{a_0(j\omega)^n + \dots + a_n}{b_0(j\omega)^m + \dots + a_m} \quad (7)$$

дасть амплітудно-фазову характеристику елементу.

Для знаходження амплітудно-фазових частотних характеристик розраховується, розбиваючи вираз $\Phi(j\omega)$ на уявну і неуявну частини $\Phi(j\omega) = \text{Re}(\omega) + j \text{Im}(\omega)$ і визначаючи значення $\text{Re}(\omega)$ і $\text{Im}(\omega)$ в діапазоні величини ω від 0 до ∞ . При цьому по осі абсцис відкладається величина $\text{Re}(\omega)$, по осі ординат – $\text{Im}(\omega)$. Величина $\text{Re}(\omega)$ є дійсною частотною характеристикою, величина $\text{Im}(\omega)$ – уявною. Графік вектора $U(\omega) = \sqrt{\text{Re}^2(\omega) + \text{Im}^2(\omega)}$ вважається амплітудною частотною характеристикою, яка показує, як затухає гармонійна дія виду $U \cdot \sin(Wt)$, що проходить через систему 4, графік кута $\varphi(\omega) = \arctg \frac{\text{Im}(\omega)}{\text{Re}(\omega)}$ дає фазову

частотну характеристику. На виході системи отримуємо сигнал

$$y(t) = U(\omega) \sin(\omega t + \varphi). \quad (8)$$

Частотні методи аналізу процесів досить прості, допускають спрощені рішення, дозволяють отримати зручні розрахункові формули, тому їх можна застосувати для визначення частотного діапазону роботи трубопроводу, який дає можливість оцінити число членів ряду в рішеннях нестационарних режимів.

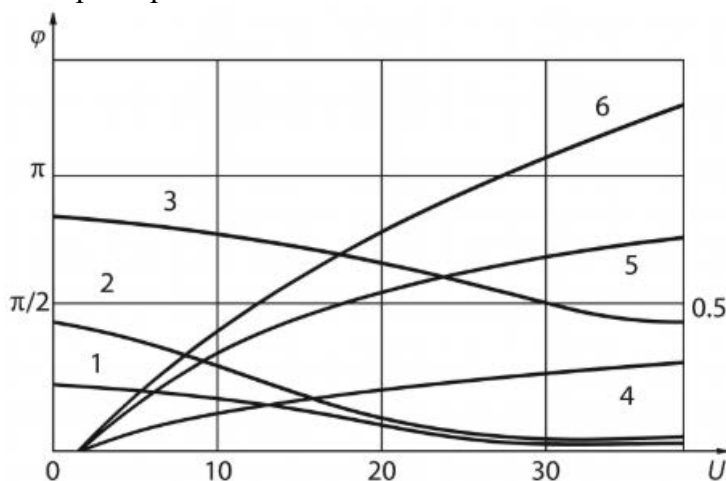


Рис. 2. Амплітудно-частотні і фазово-частотні характеристики газопроводу

При аналізі використовуватимемо відомі рівняння руху газу та нерозривності у вигляді:

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{k}{F} G;$$

$$-\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{c^2}{F} \cdot \frac{\partial}{\partial x} G,$$

де $G = \rho v_{cp} F$ – масова витрата в трубопроводі; v_{cp} – осереднена швидкість газу, справедлива для досить довгих трубопроводів ($D/L < 5 \cdot 10^4$). Для тиску маємо:

$$\frac{\partial p}{\partial t} - \frac{c^2}{k} \cdot \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0. \quad (9)$$

Застосовуючи перетворення Лапласа за умов

$$p(x, 0) = 0; \quad p(0, t) = p_0(t); \quad p(l, t) = p_1(t), \quad (10)$$

отримуємо

$$p(x, s) = U_1(x, s)p_0(s) + U_2(x, s)p_1(s), \quad (11)$$

де

$$U_1(x, s) = ch \, x \sqrt{\frac{sk}{c^2}} \left(1 - \frac{thx \sqrt{\frac{sk}{c^2}}}{thl \sqrt{\frac{sk}{c^2}}} \right); \quad U_2(x, s) = \frac{shx \sqrt{\frac{sk}{c^2}}}{shl \sqrt{\frac{sk}{c^2}}}. \quad (12)$$

На рис. 2 амплітудно-частотні і фазово-частотні характеристики побудовані для $x = 0,8l$ і $x = 0,5l$ при різних значеннях величини $l^2 \omega k / c^2$. Як бачимо, при значеннях $(l^2 \omega k / c^2) < 1$ помилка по амплітуді складає менше 5%. Це означає, що при аналізах режимів можна обмежитися коливаннями в газопроводі при частотах

$$\omega_H > \frac{c^2}{l^2 k} = \frac{c^2 2D}{l^2 \lambda v_{cp}}. \quad (13)$$

Для газопроводу ($D = 0,8$ м; $\lambda = 0,02$; $v_{cp} = 10$ м/с; $l = 100$ км) отримуємо

$$\omega_H = \frac{300^2 \cdot 2 \cdot 0,8}{10^{10} \cdot 0,02 \cdot 10} = 0,26 \text{ 1/год.}$$

Виходячи з того, що коливання в газопроводі з точністю до 3-6% апроксимуються шістьма-вісьмома чисельними рядами Фур'є, можна оцінити частотний діапазон роботи газопроводу (від ω_H до $\omega \approx 10 \omega_H$) або для магістральних газопроводів при $D > 0,5$ і $l > 50$ км. оцінка діапазону частот лежить в межах від 0,1 до 20 1/год, що відповідає періоду T від 62,8 до 0,3 год.

Висновки

Використання частотних методів, який розглянутий в задачах застосування методів імпедансу при розрахунках нестационарних процесів, є доцільним для оцінки частотного діапазону роботи газопроводу, отримання спрощених методів аналізу режимів газопроводу, чисельних способів згортання операційних рівнянь, при аналізі роботи газопроводу методами статистичної динаміки, рівнянь неусталеного руху газу по газопроводу.

Література

1. Говдяк Р.М. Енергоекологічна безпека нафтогазових об'єктів / Р.М. Говдяк, Я.М. Семчук, Л.Б. Чабанович та ін. Івано-Франківськ, Лілея-НВ, 2007. – 554 с.
2. Грудз Я.В. Енергоефективність газотранспортних систем / Я.В. Грудз. Івано-Франківськ: Лілея-НВ, – 2012. – 186 с.
3. Грудз Я.В. Енергетичний баланс трубопровідного транспорту газу / Я.В. Грудз // *Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ*. – № 3(40). – 2012. – 74-54 с.
4. Грудз Я.В. Оцінка впливу нестационарності газового потоку на енергоефективність транспорту газу / Я.В. Грудз // *Науковий вісник ІФН-ТУНГ. Випуск 3*, 2012 – С. 137-143
5. Грудз В.Я. Математична модель магістрального газопроводу як єдиної енергосистеми / В.Я. Грудз, Я.В. Грудз, Л.Т. Гораль та ін. // Міжнародна науково-технічна конференція «*Нафтогазова енергетика: проблеми та перспективи*». Івано-Франківськ, 2009. – С. 34-35
6. Грудз В.Я. Оптимізація режимів роботи газонафтогазотранспортних систем України в умовах їх неповного завантаження. / В.Я. Грудз, М.Д. Середюк. *Тези доповіді в комітеті з енергозбереження Верховної Ради*. 2015.
7. Грудз Я.В. Вплив нестационарності газового потоку на енерговитрати при транспортуванні / Я.В. Грудз // *Матеріали міжнарод.наук.-техн. конф. «Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу»*. Ів.-Франківськ, 15-18 травня 2012. С.66-67
8. Грудз В.Я, Костів Я.В., Процюк В.Р., Тимків, Д.Ф. Математичне моделювання складних газотранспортних систем в комплексі ПСГ, *Scientific Journal “Science Rise”*, 2016. № 4 (21), р. 44–49.
9. Грудз В.Я. Обслуговування і ремонт газопроводів / В.Я. Грудз, Д.Ф. Тимків, В.Б. Михалків та ін. // Івано-Франківськ, Лілея-НВ, 2009 – 710 с.
10. Grudz V.Ya. Non-stationary processes in the gas transmission systems at compressor stations shut-down [Text] / V.Ya. Grudz, V.Ya. Grudz (junior), V.B. Zapukhlyak, Ya.V. Kyzymyshyn // *Journal of hydrocarbon power engineering*. – 2018. – №1(5). – Р. 22-28.

Стаття надійшла до редакційної колегії 30.10.2025 р.

Прийнято до друку 05.12.2025 р.

**DETERMINANT METHODS OF OPTIMIZATION OF OPERATING
MODES OF GAS TRANSPORTATION SYSTEMS**

**V. Ya. Hrudz , Ya. V. Hrudz , V. V. Smih ,
R. V. Terechenko , N. R. Terefenko **

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;

76019, Ivano-Frankivsk, 15 Karpatska Street;

tel. +38 (0342) 72-71-38; e-mail: volodymyr.hrudz@nuing.edu.ua

The paper presents the principles of studying unsteady processes in main gas pipelines under conditions of partial loading, based on the application of frequency methods for analyzing flow dynamics. A method for constructing amplitude-frequency characteristics of the system under static and dynamic loads is proposed, which makes it possible to evaluate the gas transmission system's response to disturbances of different frequencies and amplitudes. The conditions for applying the frequency approach to determine the main parameters of transient processes and to select optimal pipeline operating modes are discussed.

The purpose of the study is to develop methods for rational planning of gas transmission system operating modes based on frequency characteristics, using the criterion of minimizing the duration of the unsteady process. Analytical equations were derived to establish the relationship between the propagation velocity of small perturbations in the gas flow and the linear coordinate under steady-state conditions. Analysis of the calculation results showed that discrepancies between the sound velocity values obtained by different methods range from 2,1% to 5,8%, with lower actual disturbance propagation velocities corresponding to greater deviations between results.

The research findings make it possible to improve existing methods for diagnosing small gas leaks based on oscillation analysis and frequency characteristics. A method for applying frequency-based approaches in impedance analysis during calculations of unsteady processes is proposed. This approach allows for determining the frequency range of pipeline operation, performing simplified regime analyses, and numerically implementing operational equations for unsteady gas flow. The proposed methodology contributes to improving the accuracy of modeling unsteady processes and developing advanced diagnostic systems for main gas pipelines.

Keywords: *main gas pipeline, non-stationary process, amplitude-frequency phase characteristic.*