

УДК 622.612.52:622.612.51

DOI: 10.31471/2304-7399-2025-21(79)-295-301

РАЦІОНАЛЬНІ ПОКАЗНИКИ ТРАНСПОРТУВАННЯ ГАЗУ ГАЗОТРАНСПОРТНИМИ СИСТЕМАМИ ЗА УМОВ ЇХ НЕПОВНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ

В. Я. Грудз , П. Я. Книш 

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@nung.edu.ua

Роботу присвячено встановленню закономірностей протікання технологічних процесів в газотранспортних системах для оптимізації оперативного керування експлуатаційними режимами за умови їх неповного завантаження.

Створено математичну модель нестационарних процесів в газопроводі з врахуванням впливу компресорних станцій на основі класичних рівнянь енергії газового потоку і нерозривності з використанням функцій $\delta(x)$ Дірака. Реалізація створеної математичної моделі дозволила отримати в аналітичній формі залежність, що відображає закон коливання в часі масової витрати і тиску. Побудовані залежності тренду продуктивності газотранспортної системи на її початку і в кінці показали вплив розміщення компресорної станції в газотранспортній системі, зокрема її порядкового номеру на трасі, на характер нестационарного процесу, викликаного її зупинкою, зокрема на тривалість нестационарності.

Запропоновано на основі результатів досліджень принцип оптимізації режимів роботи газотранспортної системи в умовах неповного завантаження за критерієм мінімальних енерговитрат на транспорт газу при максимальному рівні надійності газопостачання.

Ключові слова: газотранспортна система, неповне завантаження, компресорна станція, лінійна частина, оптимізація режимів, діагностика.

Вступ

Газотранспортна система України є однією з найпотужніших у світі за обсягом транспортування та збору газу. На даний момент газотранспортна система знаходиться у справному технічному стані, гідравлічний ККД лінійних ділянок газопроводів знаходиться в межах 95% – 98%, газоперекачувальні агрегати та обладнання компресорних станцій знаходяться у справному стані, завдяки чому проектна пропускна здатність може бути досягнута при граничному використанні всіх потужностей системи. При цьому забезпечуються параметри максимального технологічного режиму та

використовується наявна потужність обладнання системи. Однак, через обмеження постачання газу, продуктивність системи знизилася до 100 – 120 млн м³ на добу, що становитиме 36 – 55 млрд м³ на рік. За таких умов виникає набір допустимих режимів роботи системи, і залежно від вибору найбільш раціонального з них можна мінімізувати енергетичні витрати на транспортування газу, тобто заощадити певну кількість енергоносіїв [1, 2].

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень та публікацій

Сучасні вітчизняні дослідження з раціоналізації режимів транспортування газу активно розвиваються у наукових школах Грудза В. Я. та профільних інститутів НАН України. Значний внесок у моделювання нестаціонарних процесів та оптимізацію режимів зробили В. Грудз, О. Іванов [2], які досліджують динаміку тиску, витрати та формування оптимальних режимів роботи магістральних газопроводів у періоди зменшеного навантаження. У їх працях обґрунтовано підходи до зниження енерговитрат компресорних станцій, визначення запасів газу в трубопроводі та вибору економічно доцільних схем роботи агрегатів.

Вітчизняні автори наголошують на необхідності часткового відключення паралельних ниток, зупинки або переведення частини компресорних агрегатів у неповні режими для зменшення витрат паливного газу. Роботи Грудза В. Я. [2] та Жидкова М.О. [5] демонструють важливість точного обліку газу «в трубі» та розвитку алгоритмів прогнозування режимів на основі трансієнтного моделювання.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми

При неповному завантаженні складної газотранспортної системи можливі коливання тиску газу в газопроводах при заданій постійній продуктивності. Для дослідження технологічних режимів при неповному завантаженні газотранспортної системи створено математичну модель коливань тиску в газопроводах, спричинених зміною значення продуктивності за умови неповного завантаження, реалізація якої для умов реальних газопроводів дозволила встановити амплітудно-частотні характеристики нестаціонарного процесу. Встановлено, що в низькочастотній області коливань тиску амплітуда може перевищувати значення 1 МПа, що призведе до виходу абсолютного значення тиску за межі допустимого інтервалу. Крім того, необхідно враховувати той факт, що швидкості поширення збурень у газопроводі при високому та низькому тиску будуть суттєво відрізнятися, що вплине на частотні характеристики нестаціонарного процесу.

Виходячи з вищесказаного, слід зробити висновок, що, незважаючи на характеристики економічної ефективності транспортування газу при високому тиску, бажано залишати певний запас можливих амплітудних коливань тисків, щоб запобігти виходу абсолютного значення тиску за граничні лінії розрідження. Це вимагає визначення допустимих меж коливань тиску в газотранспортній системі за умови її неповного завантаження на основі створених математичних моделей.

Мета та завдання досліджень

Мета роботи полягає у встановленні закономірностей протікання технологічних процесів в газотранспортних системах для оптимізації оперативного керування експлуатаційними режимами за умови їх неповного завантаження.

Дослідження

В умовах неповного завантаження газотранспортної системи основними причинами нестаціонарності слід вважати періодичне відключення і включення компресорних станцій з метою зміни обсягів транспортування газу та планові зміни відбору і подачі газу в систему. При цьому важливими задачами є встановлення тривалості нестаціонарного процесу і амплітуда коливання тиску. Дослідження проводились на математичній моделі, побудованій на основі рівнянь руху і нерозривності з урахуванням підвищення тиску на виході компресорних станцій і періодичності їх включення чи зупинки.

$$-\frac{\partial P}{\partial t} + \sum_{i=1}^m \Delta P_{KCi} \delta(x - x_i) = \left(\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\lambda(\rho w^2)}{2d} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = -c^2 \frac{\partial(\rho w)}{\partial x}$$

$P(x, t)$ – тиск в газопроводі як функція лінійної координати x і часу t ; $\delta(x - x_i)$ – функція джерела Дірака; $\sigma(t)$ – одинична функція Хевісайда; ΔP_{KCi} – підвищення тиску на виході компресорної станції.

Вважається, що до початку процесу газопровід був зупинений з рівномірно розподіленим тиском $P(x, 0) = P_0$, а при $t > 0$ тиск на початку складав P_H , а в кінці – P_K .

Розв'язок системи при вказаних умовах отримано методом інтегральних перетворень у вигляді:

$$P(x, t) = P_0 + (P_H - P_K) \frac{x}{L} + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^m \Delta P_{KCi} \left\{ \begin{aligned} &\left(1 - \frac{x}{L}\right) \text{ при } x > x_i \\ &\left(-\frac{x}{L}\right) \text{ при } x < x_i \end{aligned} \right\} +$$

$$+ \Delta P_{Kck} [\sigma(t) - \sigma(t - t_1)] \left\{ \begin{aligned} &\left(1 - \frac{x}{L}\right) \text{ при } x > x_i \\ &\left(-\frac{x}{L}\right) \text{ при } x < x_i \end{aligned} \right\} + \sum_{n=1}^{\infty} C_n e^{-at} f(n, t) \sin\left(\frac{\pi n x}{L}\right) + \quad (2)$$

$$+ \frac{2}{\pi} \Delta P_{Kck} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cos\left(\frac{\pi n x_k}{L}\right) \sin\left(\frac{\pi n x}{L}\right) e^{-a(t-t_1)} f(n, t-t_1) \sigma(t-t_1).$$

де: $f(n, t) = \cos\left(\sqrt{\left(\frac{\pi n c}{L}\right)^2 - a^2} t\right) + \frac{a}{\sqrt{\left(\frac{\pi n c}{L}\right)^2 - a^2}} \sin\left(\sqrt{\left(\frac{\pi n c}{L}\right)^2 - a^2} t\right)$

В результаті реалізації створеної математичної моделі встановлено, що коливання тиску в газовому потоці можуть мати різну частоту та амплітуду залежно від причини, що їх викликала. Тому коливання тиску умовно поділяються на високочастотні, середньочастотні та низькочастотні. Високочастотні характеризуються частотою в діапазоні 0,4 – 4,0 Гц і, як правило, є наслідком різкої зміни параметра (тиску, витрати) в певному поперечному перерізі газопроводу. Амплітуда таких коливань може досягати 1 МПа. Коливання поширюються вздовж газопроводу зі швидкістю звуку, при цьому амплітуда та частота зменшуються. Середньочастотний діапазон становить 0,5 – 10 Гц; такі коливання викликають плавні зміни параметрів потоку в часі. Вони поширюються вздовж трубопроводу зі значно меншою дискримінацією затухання. Низькочастотні коливання викликані добовою нерівномірністю споживання газу та лежать у діапазоні частот 10-5 – 0,5 Гц. Амплітуда коливань тиску залежить від характеру фактора збурення та може бути необмеженою (наприклад, для умов заповнення ділянки газопроводу газом). В умовах високочастотних коливань визначальну роль у формуванні процесу відіграють сили інерції та сили гідравлічного опору в газовому потоці. Для середньо- та низькочастотних коливань основним джерелом є сили гідравлічного опору трубопроводу. З точки зору забезпечення надійної роботи газотранспортної системи визначальну роль відіграють високочастотні коливання тиску, оскільки такий процес є найбільш непередбачуваним (рис. 1.)

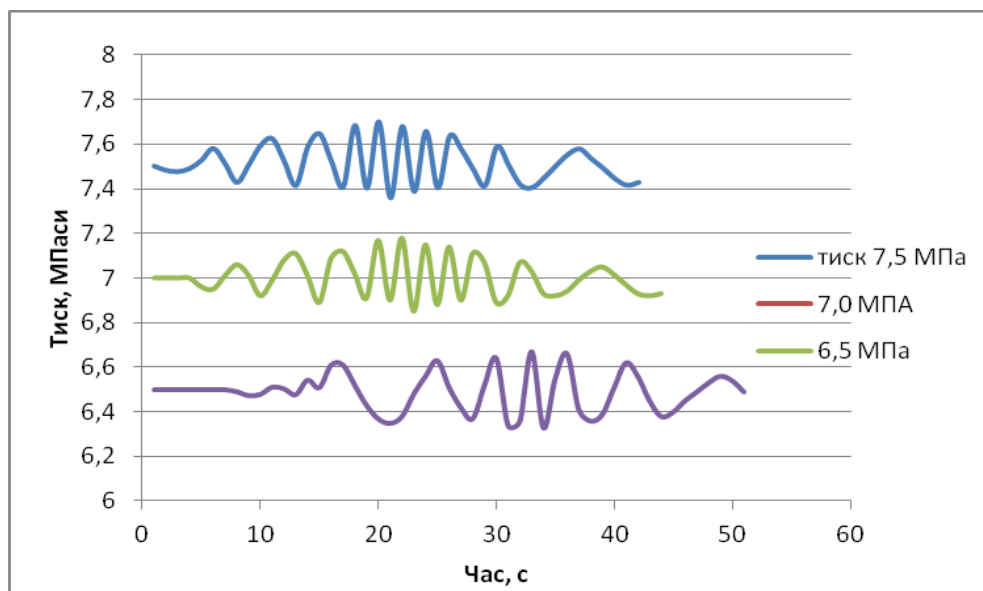


Рис. 1. Вплив робочого тиску в газопроводі на характер перебігу нестационарного процесу

Оскільки частота та амплітуда коливань тиску, спричинені порушеннями параметрів газового потоку, є характеристиками нестационарного процесу, то існує зв'язок між амплітудно-частотними характеристиками та критерієм нестационарності.

Таким чином, виникає задача оптимізації, яка полягає у визначенні раціональних значень тисків стаціонарного процесу в газопроводі, при яких, з одного боку, досягаються мінімальні енерговитрати на транспортування, а з іншого боку, забезпечується безпека експлуатації трубопровідних систем.

Аналіз результатів дослідження показує, що при раптовій зміні витрати газу хвиля тиску поширюється зі швидкістю звуку до початкового поперечного перерізу газопроводу, де тиск максимальний, і викликає коливальний процес, амплітуда та частота якого поступово зростають і досягають максимуму через 4-6 періодів коливань, після чого амплітуда та частота процесу починають зменшуватися. Загальна тривалість коливального процесу з високими значеннями амплітуди та частоти знаходиться в межах 50-60 с, що вважається короткочасним перевантаженням трубопроводу. Згодом амплітуда та частота коливань тиску значно зменшуються, а протягом 1800-2100 с коливальний процес повністю згасає, переводячи роботу газопроводу в новий стаціонарний режим.

Серія розрахунків, виконаних за допомогою запропонованої математичної моделі, дозволила встановити ряд закономірностей у характері коливального процесу, спричиненого раптовою зміною витрати газу. Зокрема, було виявлено, що при зменшенні робочого тиску в газопроводі збільшується загальна тривалість як високочастотного діапазону коливального процесу, так і нестационарного процесу в цілому, а частота коливань та їх амплітуда зменшуються. Так, при зменшенні робочого тиску з 7,5 МПа до 7 МПа (на 6,7%) максимальна амплітуда коливань тиску зменшується з 0,199 МПа до 0,18 МПа, тобто на 9,5%, а при зменшенні робочого тиску до 6,5 МПа (на 13,3%) зменшення амплітуди коливань тиску становить 34,7%. Максимальна частота коливального процесу при робочому тиску 7,5 МПа становить 0,44 Гц, а при зменшенні тиску до 7 МПа вона зменшується на 21,8%, а при подальшому зменшенні тиску до 6,5 МПа – на 39,4%. З фізичної точки зору, ця закономірність пояснюється зменшенням пружності середовища для поширення вібраційних хвиль, що призводить до зменшення швидкості поширення збурень і, як наслідок, збільшення тривалості нестационарного процесу та його високочастотної смуги.

Максимальна частота коливань тиску в нестационарному процесі зменшується зі збільшенням витрати концентрованого відбору. При збільшенні витрати концентрованого відбору від 10% витрати газу в газопроводі до 20% максимальна частота коливань тиску зменшується

на 5,8%, а при подальшому збільшенні витрати концентрованого відбору до 30% витрати газу в газопроводі зменшення максимальної частоти коливань тиску становить 12,3%.

Висновки

На основі аналітичних досліджень нестационарного процесу в газопроводі, викликаного стрибкоподібною зміною витрати газу, встановлено, що при максимально допустимому стаціонарному тиску на початку лінійної ділянки газопроводу амплітуда його коливання може призвести до короточасного перевантаження стінок труби, що вимагає в умовах оперативного керування режимами прийняття рішення про забезпечення допустимого тиску, на виході компресорної станції; встановлено закономірності протікання нестационарних процесів в газотранспортних системах великої протяжності, викликаних зупинкою компресорних станцій, зокрема доведено, що на тривалість нестационарного перехідного режиму має суттєвий вплив розміщення відключеної КС на трасі газопроводу, причому з збільшенням її порядкового номера в системі тривалість нестационарного процесу і величина зниження продуктивності зменшуються

Література

1. Грудз В.Я. Оптимізація режимів роботи газонафтотранспортних систем України в умовах їх неповного завантаження. / В.Я. Грудз, М.Д. Середюк. Тези доповіді в комітеті з енергозбереження Верховної Ради. 2015.
2. Трубопровідний транспорт газу. / М.П. Ковалко, В.Я. Грудз, В.Б. Михалків та ін. – К.: АренаЕКО, 2002. – 600 с.
3. Грудз Я.В. Энергоэффективность газотранспортных систем. / Я.В. Грудз. Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2012. – 208 с.
4. Керування режимами газотраспортних систем / В.Я.Грудз, М.Т. Лінчевський, В.Б. Михалків та ін. – К.: Укргазпроект, 1996. – 140 с.
5. Жидкова М.О. Моделювання технологічних процесів і підвищення ефективності трубопровідного транспортугазу. // Вісник АН УРСР ТЗ. – Київ: Наукова думка, 1985. с. 37-44.
6. Методика розрахунку розподілення потоків газу в складних газотранспортних системах і підрахунку його запасів в трубах // В.Я. Грудз, Я.В. Грудз, Д.Ф. Тимків та ін. // Фонди НАК "Нафтогаз України", 2003.
7. Обслуговування і ремонт газопроводів / В. Я. Грудз та ін.; під. заг. ред. В. Я. Грудз. Івано-Франківськ: Лілея НВ, 2009. 711 с.
8. Режимы газотранспортных систем / Яковлев Е.И., Казак О.С., Михалків В.Б., Тимків Д.Ф., Грудз В.Я. – Львів: Світ, 1993. – 170 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії 30.10.2025 р.

Прийнято до друку 05.12.2025 р.

**RATIONAL INDICATORS OF GAS TRANSPORTATION
BY GAS TRANSPORTATION SYSTEMS UNDER
THE CONDITION OF THEIR INCOMPLETE LOAD****V. Ya. Hrudz , P. Ya Knysh ***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@nunge.edu.ua*

The work is devoted to establishing the regularities of technological processes in gas transportation systems for optimizing operational control of operating modes under conditions of their incomplete loading.

A mathematical model of non-stationary processes in a gas pipeline was created taking into account the influence of compressor stations on the basis of classical equations of gas flow energy and continuity using Dirac source functions. The implementation of the created mathematical model allowed obtaining in analytical form a dependence that reflects the law of oscillation in time of mass flow and pressure. The constructed dependences of the productivity trend of the gas transportation system at its beginning and at the end showed the influence of the placement of the compressor station in the gas transportation system, in particular its serial number on the route number, on the nature of the non-stationary process caused by its stop, in particular on the duration of non-stationarity.

Based on the research results, a principle of optimizing the operating modes of the gas transportation system under conditions of incomplete loading was proposed according to the criterion of minimum energy consumption for gas transportation at the maximum level of gas supply reliability.

Keywords: *gas transportation system, partial load, compressor station, linear part, mode optimization, diagnostics.*