

# **Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища**

---

---

УДК 621.438:622

DOI: 10.31471/2304-7399-2023-18(68)-137-145

## **РАЦІОНАЛЬНІ РЕЖИМИ ГАЗОТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ НЕСТАЦІОНАРНОГО ТРАНСПОРТУВАННЯ ГАЗУ**

**В. Я. Грудз, Я. В. Грудз, Р. Б. Стасюк, В. І. Баволяк,  
Я. С. Капущак, О. А. Туровський**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;  
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;  
e-mail: [snp@nung.edu.ua](mailto:snp@nung.edu.ua)*

*Розглянуто проблему раціонального регулювання режимів роботи газотранспортної системи, яка експлуатується в умовах нестационарного транспортування газу. Дано оцінку математичного моделювання нестационарних процесів в складних газотранспортних системах при нерівномірному газоспоживанні і диверсифікації джерел поступлення енергоносія. На основі аналітичних досліджень вироблено рекомендації про вплив різних параметрів на ефективність експлуатації компресорної станції. Одержано залежності, які виражають характер керування процесом транспорту газу, який може бути застосований в кожному конкретному випадку для визначення реакції системи на зміну керуючого фактору. Моделювання нестационарних об'єктів газотранспортних систем доцільно проводити за допомогою адаптивної лінеаризованої системи, яка реалізує принцип енергоефективного регулювання, тобто дозволяє одночасно уточнювати параметри технологічного об'єкту і керувати його роботою. Задані технологічні обмеження за тиском, як показав аналіз, подаються у термінах зміни продуктивності і можуть бути об'єднані з обмеженнями за продуктивністю компресорної станції. Одержані границі технологічної допустимості для середньодобової витрати газу є не константами, а деякими функціями часу, поведінка яких визначається характером газоспоживання. Використання специфіки взаємозв'язку обмежень, обумовлених технологією транспорту газу, з метою побудови більш простих алгоритмів її розв'язку дозволили створити методику прогнозування режимів роботи системи в умовах нестационарного газоспоживання.*

*Ключові слова:* газотранспортна система, керування, режим, нестационарність, оптимізація.

**Вступ.** Газотранспортна система на даному етапі працює в умовах неповного завантаження і диверсифікації джерел газопостачання. Складні умови експлуатації системи вимагають особливого підходу до прогнозування режимів роботи газоперекачувальних агрегатів (ГПА) в умовах компресорних станцій (КС) з точки зору енергоекономії на транспорт газу в умовах нестабільності газоспоживання.

Добова нерівномірність споживання газу характеризується коефіцієнтом нерівномірності, який являє собою відношення середньодобової продуктивності до максимального її значення. При коефіцієнтах добової нерівномірності газоспоживання близьких до одиниці флюктуація продуктивності не викликає необхідності регулювання режимів. При флюктуативному збільшенні продуктивності зростає гідравлічний опір лінійної ділянки, що призводить до зростання тиску на виході КС і її ступеня підвищення тиску. При цьому згідно з характеристикою ГПА продуктивність машини зменшується і система повертається в початковий стан, а за певний проміжок часу встановлюється стаціонарний режим роботи. Такий процес саморегулювання режиму характерний для випадку, коли коливання продуктивності вкладається в границі характеристики ГПА. В іншому випадку необхідно змінити характеристику КС шляхом зміни швидкості обертання ротора нагнітачів (плавне регулювання) або шляхом зміни технологічної схеми КС (ступінчате регулювання).

**Аналіз літературних джерел.** Питанням аналізу нестационарних процесів в газопроводах і складних газотранспортних системах присв'ячено ряд досліджень Бобровського С.А. [1], Гарляускаса А.И. [2], Грудза В.Я. [3-5], Жидкової М.О. [6, 7], Чарного І.А. [8, 9], Щербаківа С.Г. [10], Яковлева Є.І. [11, 12], в яких дається характеристики нестационарності, приводяться математичні моделі процесів, розглядаються питання акумуляції газу при нерівномірному споживанні, розроблено рекомендації керування режимами системи. Однак, питанням вибору раціонального режиму регулювання продуктивності системи в умовах нестабільності поступлення і відбору газу з системи при мінімальних енергозатратах на транспортування не приділено належної уваги.

**Мета роботи.** Прогнозування раціональних режимів експлуатації магістральних газопроводів в умовах нестационарного газоспоживання на аналітичних моделях з урахуванням допустимих методів керування роботою ГПА на КС для забезпечення мінімальних енерговитрат на транспортування газу.

**Основна частина.** Як відомо [4, 5], ізотермічний характер руху газу в трубах описується системою диференціальних рівнянь в часткових

похідних, до якої входять рівняння руху (імпульсу) і нерозривності потоку:

$$\frac{\partial \rho}{\partial x} + \alpha W \frac{\partial(\rho W)}{\partial x} + \rho g \frac{dh}{dx} + \frac{\partial(\rho W)}{\partial t} + \frac{\lambda \rho W^2}{2d} = 0,$$

$$\frac{\partial(\rho W)}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, \tag{1}$$

Перший член рівняння руху являється градієнтом тиску і єдиною рухомою силою в потоці газу; другий член представляє Кориолісові втрати енергії, які за даними [4, 5] не перевищують 1% від загальних енерговтрат; третій член визначає гравітаційні втрати, якими для горизонтальних газопроводів нехтують; четвертий член характеризує інерційні втрати енергії, які для протяжних газопроводів суттєво менші за енерговитрати на тертя, представлені п'ятим членом. Таким чином система рівнянь (1) зводиться до вигляду:

$$-\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{k}{F} M ;$$

$$-\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{c^2}{F} \frac{\partial M}{\partial x}, \tag{2}$$

де  $M = \rho w F$  – масова витрата газу;  $w$  – лінійна швидкість;  $\rho$  – густина;  $F$  – площа поперечного перерізу труби.

Система (1) може бути зведена до рівняння

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -k \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0, \tag{3}$$

де  $k = \frac{c^2}{2a}$ ;  $2a = \frac{\lambda w_{cp}}{2d}$  – коефіцієнт лінеаризації;  $\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного опору;  $w_{cp}$  – середня усереднена лінійна швидкість газу.

На систему накладаються обмеження:

- по тисках  $P(0, t) \leq P_{\max}$ ;  $P(L, t) \geq P_{\min}$  (4)

- по продуктивності

$$rQ_{\max} \geq Q_{RC} \geq rQ_{\min} \quad (r - \text{число паралельно працюючих ГПА на КС}) \tag{5}$$

- по обертах і потужності ГПА

$$(n/n_n)_{\max} \geq (n/n_n) \geq (n/n_n)_{\min}; (Nr)_{\max} \geq N_{KC} \geq (Nr)_{\min}; \tag{6}$$

Як відомо [11], для лінеаризованого рівняння нестационарного руху газу, яке входить як обмеження в задачу оптимізації середньої продуктивності компресорної станції, відносно просто одержати аналітичний розв'язок за допомогою функції Гріна, так як з лінійності рівняння безпосередньо впливає справедливості принципу суперпозиції [3, 4, 12]. Так як при цьому повинна спостерігатись однорідність в граничних умовах, необхідно шляхом заміни змінної перейти до однорідної задачі.

Для цього необхідно побудувати допоміжну функцію  $Z(x,t)$ , яка б задовольняла умовам:

$$Z'_x(0,t) = P'_x(0,t) : Z'_x(L,t) = P'_x(L,t). \quad (7)$$

Для того, щоб побудувати функцію  $Z(x,t)$ , необхідно попередньо забрати нелінійність у крайових умовах, які входять в математичну постановку розв'язуваної задачі оптимізації. Для цього потрібно провести лінеаризацію, на основі якої одержане рівняння протікання газу. При заміні відношення витрати до тиску деякою константою ( $a$ ), одержимо такі крайові умови:

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial P}{\partial x} \right|_{x=0} = aQ_{cp} \\ \left. \frac{\partial P}{\partial x} \right|_{x=L} = aQ_p(t) \end{cases}. \quad (8)$$

За  $Z(x,t)$  приймаємо функцію:

$$Z(x,t) = \frac{(L-x)^2}{4L} aQ_{cp} - \frac{x^2}{4L} aQ_p(t). \quad (9)$$

Легко перевірити, що вона задовольняє необхідні вимоги. Дійсно,

$$\frac{\partial Z}{\partial x} = \frac{(L-x)}{2L} aQ_{cp} - \frac{x}{2L} aQ_p(t),$$

при  $x=0$ :

$$Z'_x(0,t) = aQ_{cp} = P'_x(0,t),$$

при  $x=L$ :

$$Z'_x(L,t) = aQ_p = P'_x(L,t).$$

Таким чином, побудована допоміжна функція задовольняє висунуті вимоги.

Проведемо заміну змінної:

$$V(x,t) = P(x,t) - Z(x,t),$$

і знайдемо похідні за часом і за координатою – для підстановки їх у рівняння руху газу. Похідна за часом:

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{x^2}{2L} aQ_p(t),$$

звідки

$$\frac{\partial P}{\partial x} = \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{x^2}{2L} aQ_p(t). \quad (10)$$

Похідні за координатою:

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{Lx}{2L} aQ_{cp} + \frac{Lx}{2L} aQ_p(t), \quad (11)$$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} - \frac{a}{2L} Q_{cp} + \frac{a}{2L} Q_p(t), \quad (12)$$

звідки

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{a}{2L} [Q_{cp} - Q_p(t)]. \quad (13)$$

Підстановка похідних у рівняння руху газу приводить до неоднорідного диференційного рівняння

$$\frac{\partial V}{\partial t} = k \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + f(x,t), \quad (14)$$

де

$$f(x,t) = \frac{k}{L} \left\{ [Q_{cp} - Q_p(t)] + \frac{x^2 a}{2L} Q_p(t) \right\}. \quad (15)$$

Проведення заміни змінної вимагає також перетворення початкових умов:

$$V(x,0) = P(x,0) - \frac{(L-x)}{2L} a Q_{cp} + \frac{x^2 a}{2L} Q_p(0). \quad (16)$$

Таким чином, краєва задача набуде вигляду:

$$\begin{cases} \frac{\partial V}{\partial t} = k \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + f(x,t) \\ \left. \frac{\partial V}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial V}{\partial x} \right|_{x=L} = 0 \\ V(0,x) = P(0,x) - \frac{(L-x)^2}{2L} a Q_{cp} + \frac{x^2}{2L} a Q_p \end{cases} \quad (17)$$

Як відомо, розв'язок такої задачі можна подати у формі:

$$\begin{aligned} V(x,t) = & \int_0^t \int_0^L G(x,\xi,t-\tau) \varphi(\xi,\tau) \partial \xi \partial \tau + \\ & + \int_0^L G(x,\xi,t) \varphi(\xi) \partial \xi \end{aligned} \quad (18)$$

де  $G(x,\xi,t)$  – функція Гріна, яка для другої крайової задачі має вигляд:

$$\begin{aligned} G(x,\xi,t) = & \frac{2}{L} \left\{ \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} e^{-\left(\sqrt{\frac{2B}{a}} \frac{\pi n}{L}\right)^2 t} \times \right. \\ & \left. \times \cos \frac{\pi n x}{L} \cos \frac{\pi n \xi}{L} \right\}. \end{aligned} \quad (19)$$

Функції  $\varphi(x,t)$ ,  $\varphi(x)$  є правою частиною рівняння [3, 4, 6] і початковими умовами, причому [8, 9, 10]:

$$\varphi(x,t) = \frac{1}{k} f(x,t). \quad (20)$$

Таким чином, для конкретної крайової задачі, яка відповідає задачі оптимізації середньої продуктивності КС за критерієм мінімуму тривалості, допускається подати розв'язок у вигляді:

$$\begin{aligned}
 V(x,t) = & \int_0^t \int_0^L G(x,\xi,t-\tau) \varphi(\xi,\tau) \left\{ \frac{a}{2B} [Q_{cp} - Q_p(\tau) + \right. \\
 & + \left. \frac{\xi^2 a^2}{4Lk} Q_p(\tau) \right\} d\xi d\tau + \int_0^L G(x,\xi,t) \{ P(\xi,0) - \\
 & - \frac{(L-\xi)^2}{4L} a Q_{cp} + \frac{\xi^2}{4L} a Q_p(0) \} d\xi .
 \end{aligned} \quad (21)$$

Проведення зворотної заміни змінною дозволяє одержати формулу розподілу тиску в ділянці магістрального газопроводу:

$$P(x,t) = V(x,t) + \frac{(L-x)^2}{2L} a Q_{cp} - \frac{x^2 a}{2L} Q_p(t) . \quad (22)$$

Аналіз формули показує, що параметр  $Q_{cp}$  може бути винесений з-під інтегралів, а математичний вираз, що представляє собою функцію зміни тиску, може бути поданий у вигляді двох доданків, один з яких не містить, а другий містить  $Q_{cp}$ :

$$P(x,t) = A_1(x,t) + A_2(x,t) Q_{cp} , \quad (23)$$

де

$$\begin{aligned}
 A_2(x,t) = & \frac{a}{2L} \left\{ \frac{(L-x)^2}{2} - \int_0^L C(x,\xi,t) \frac{(L-x)^2}{2} d\xi + \right. \\
 & \left. + \int_0^t \int_0^L C(x,\xi,t-\tau) d\xi d\tau \right\} .
 \end{aligned} \quad (24)$$

Формула (22) є основою для одержання аналітичних виразів функцій-обмежень  $Q_{\min}(t)$ ,  $Q_{\max}(t)$ . Так, як з визначення функції  $Q_{\min}(t)$  випливає, що при  $Q_{cp} = Q_{\min}(t)$  тиск у момент  $t$  досягає  $P_{\min}$ , тому справедливий запис:

$$A_1(L,t') + A_2(L,t') Q_{\min}(t') = P_{\min} . \quad (25)$$

З цього рівняння просто одержати одну з шуканих формул:

$$Q_{\min}(t) = \frac{P_{\min} - A_1(L,t)}{A_2(L,t)} . \quad (26)$$

З визначення функції  $Q_{\max}(t)$  випливає, що при  $Q_{cp} = Q_{\max}(t)$  тиск в момент  $t$  досягає  $P_{\max}$ , тобто:

$$A_1(0,t') + A_2(0,t') Q_{\max}(t') = P_{\max} . \quad (27)$$

З цього рівняння одержимо наступну залежність:

$$\bar{Q}_{\max}(t) = \frac{P_{\max} - A_1(0, t)}{A_2(0, t)}. \quad (28)$$

Якщо при цьому продуктивність  $\bar{Q}_{\max}(t)$  задовольняє обмеженням (5), то переходимо до прогнозу режиму роботи ГПА; в противному випадку число паралельно працюючих ГПА слід збільшити на 1 і повернутися до (22).

Дальше прогнозують режим роботи нагнітача, користуючись характеристикою КС у вигляді [3]

$$\varepsilon^2 = ((\alpha + \beta(n/n_n)) - (\gamma + \theta(n/n_n)))\bar{Q}_{\max}(t). \quad (29)$$

В результаті визначають тиски на початку і в кінці ділянки та потужність ГПА і КС. Якщо обмеження (4)-(6) витримано, то прогноз режиму вважається раціональним.

Аналіз приведених формул функцій-обмежень показує, що їх поведінка у багатьох випадках визначається характером газоспоживання.

Таким чином, завдяки лінійності вихідного диференціального рівняння протікання газу одержано формули функцій-обмежень, необхідні для розв'язку модифікованої задачі оптимізації середньої продуктивності компресорної станції кінцевої ділянки магістрального газопроводу.

**Висновок** Запропоновано методику прогнозування раціональних режимів експлуатації магістральних газопроводів в умовах нестаціонарного газоспоживання на аналітичних лінеаризованих моделях, яка враховує можливість прийняття керуючих рішень на основі технологічно допустимих способів керування роботою ГПА на КС для забезпечення мінімальних енерговитрат на транспортування газу.

### *Література*

1. Трубопроводный транспорт газа / С.А.Бобровский, С.Г.Щербаков, Е.И.Яковлев и др. – М.: Наука, 1976. – 491 с.
2. Гарляускас А.И. Математическое моделирование оперативного и перспективного планирования систем транспорта газа. – М.: Недра, 1975. – 160 с.
3. Трубопровідний транспорт газу / М.П. Ковалко, В.Я. Грудз, В.Б. Михалків та ін. // Київ, Арена ЕКО, 2002, – 600 с.
4. Керування режимами газотранспортних систем / В.Я. Грудз, М.Т. Лінчевський, В.Б. Михалків та ін. – К.: Укргазпроект, 1996. – 140 с.
5. 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.
6. Жидкова М. А. Переходные процессы в магистральных газопроводах / М.О. Жидкова – Киев: Наукова думка, 1979. – 255 с.
7. Жидкова М. А. Трубопроводный транспорт газа / М.О. Жидкова – Киев: Наукова думка, 1973. –142 с.

8. Чарный И.А. Неустановившиеся движения реальной жидкости в трубах / И.А. Чарный – М.: Недра, 1975. – 224 с.
9. Чарный И.А. Основы газовой динамики / И.А. Чарный – М.: Гостехиздат, 1961. – 200 с.
10. Щербаков С.Г. Проблемы трубопроводного транспорта нефти и газа / С.Г.Щербаков – М.: Наука, 1982. – 206 с.
11. Яковлев Е.И. Анализ неустановившихся процессов в нитках магистрального газопровода статистическими методами // Изв.вузов. Нефть и газ. – 1968. – № 2. – С.72–76.
12. Optimal gas transport management taking into account reliability factor / V. Grudz, Ya. Grudz, V. Zapukhliak, I. Chudyk, L. Poberezhny, N. Slobodyan // Management Systems in Production Engineering. – 2020 – Vol. 28, № 3. – P. 202–208. DOI: 10.2478/mspe-2020-0030.
13. Meshalkin, V.P.; Moshev, E.R. / Modes of functioning of the automated system “pipeline” with integrated logistical support of pipelines and vessels of industrial enterprises. // J. Mach. Manuf. Reliab. 2015, 44, 580–592, doi:10.3103/S1052618815070109.
14. В.Б. Запукхляк, О.М. Марчук, А.В. Грицанчук. Аналіз розрахунку напруженого стану трубопроводів під час капітального ремонту. Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування. Праці V Міжнародної науково-технічної конференції, (Тернопіль 19-22 вересня 2017 р.) – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017. – С. 191-194.
15. Zapukhliak V. Mathematical modeling of unsteady gas transmission system operating conditions under insufficient loading / V. Zapukhliak, L. Poberezhny, P. Maruschak, V. Grudz Jr., R. Stasiuk, J. Brezinová, A. Guzanová // Energies. – 2019 – Volume 12, Issue 7 (April-1 2019). – P. 1–14. EISSN 1996-1073

*Стаття надійшла до редакційної колегії 27.06.2023 р.*

## **RATIONAL MODES OF GAS TRANSPORT SYSTEMS IN THE CONDITIONS OF UNSTATIONARY GAS TRANSPORT**

**V. Ya. Grudz, Y. V. Grudz, R. B. Stasyuk, V. I. Bavolyak,  
Y. S. Kapushchak, O. A. Turovskyi**

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

*The problem of rational regulation of the operation modes of the gas transportation system, which is operated in conditions of non-stationary gas transportation, is considered. An assessment of the mathematical modeling*

*of non-stationary processes in complex gas transport systems with uneven gas consumption and diversification of sources of energy supply is given. Based on analytical studies, recommendations are made on the influence of various parameters on the efficiency of compressor station operation. Dependencies are obtained that express the nature of gas transport process control, which can be applied in each specific case to determine the response of the system to a change in the control factor. Modeling of non-stationary objects of gas transport systems should be carried out using an adaptive linearized system, which implements the principle of energy-efficient regulation, i.e. it allows to specify the parameters of the technological object and control its operation at the same time. As the analysis showed, the given technological constraints on pressure are presented in terms of changes in productivity and can be combined with constraints on the productivity of the compressor station. The obtained limits of technological admissibility for the average daily gas consumption are not constants, but some functions of time, the behavior of which is determined by the nature of gas consumption. The use of the specifics of the interrelationship of restrictions caused by the technology of gas transport, in order to build simpler algorithms for its solution, made it possible to create a methodology for forecasting the system's operating modes in conditions of non-stationary gas consumption.*

**Keywords:** *gas transport system, control, mode, non-stationarity, optimization.*