

# **Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища**

---

---

УДК 622.691

DOI: 10.31471/2304-7399-2022-17(64)-169-178

## **ПРИНЦИПИ ОПТИМІЗАЦІЇ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РОБОТИ ГАЗОТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ ЗА УМОВИ ЇХ НЕПОВНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ**

**В. Я. Грудз, Я. В. Грудз, В. Р. Процюк, В. П. Підлуський,  
О. М. Портечин, Б. І. Гершун**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;  
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;  
тел. +38(0342)72-71-38; e-mail: srgg429@gmail.com*

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

*На основі дослідження стаціонарних режимів роботи газотранспортної системи при зміні обсягів перекачування газу запропоновано принцип побудови математичної моделі на основі суперпозиції характеристик лінійних ділянок і компресорних станцій, що дає можливість оцінити пропускну здатність системи, параметри режиму роботи і енерговитрати на транспорт газу.*

*Наведено методи побудови системи інтегральних коефіцієнтів впливу для газотранспортних систем з метою оцінки параметрів їх роботи на стаціонарних режимах експлуатації. Кожна зміна технологічних параметрів режиму роботи на вході газотранспортної системи обов'язково викличе реакцію системи, яка проявиться у зміні відповідних параметрів на її виході. Очевидно, що параметри входу і виходу системи пов'язані між собою складною системою рівнянь, реалізація якої вимагає певних часових витрат і збору додаткової інформації про технічний і гідрогазодинамічний стани системи на кожен момент часу. В умовах неповного завантаження газотранспортної системи, що передбачає часту зміну режимів її експлуатації, реалізація поставленої задачі не завжди можлива. Пропонується створити систему інтегральних коефіцієнтів впливу, які характеризують співвідношення вхі-*

дної і вихідної інформації у різних стаціонарних режимах, і формально подати її в матричному вигляді

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, газоперекачувальний агрегат, оптимізація режимів.

**Вступ.** Пропускна здатність складної системи газопроводів як функція параметрів режиму є основним виробничим показником, який характеризує ступінь використання газопроводів за призначенням. Характеристикою лінійної ділянки магістрального газопроводу будемо вважати математичну залежність між квадратами тисків на її кінцях і витратою газу по газопроводу. За аналогією характеристика компресорної станції представляється як залежність між тисками на виході і вході (ступенем підвищення тиску) і її об'ємною продуктивністю. Тому задача визначення пропускної здатності системи «компресорна станція – лінійна ділянка» зводиться до суміщення їх характеристик.

Основним керуючим елементом системи транспорту газу слід вважати компресорні станції (КС). Від режиму їх роботи і його зміни залежить в основному режим експлуатації всієї системи газопостачання. Крім того, компресорні станції на магістральному газопроводі є об'єктом значної енергоємності, внаслідок чого режим їх експлуатації визначає енерговитрати на транспорт газу. Для оперативного керування режимами роботи компресорних станцій і з метою оптимізації режимів важливо знати області допустимих режимів і граничні області енерговитрат КС, а також реальний стан їх лінійної частини та обладнання, визначений діагностичними методами.

**Огляд літературних джерел.** Запропонована методика визначення пропускної здатності газотранспортної системи і стаціонарного режиму її роботи відрізняється від відомої задачі [1], в якій коефіцієнти в рівняннях характеристик вважалися сталими, функціональними залежностями коефіцієнта характеристики лінійної ділянки від витрати газу (режиму руху) і коефіцієнтів характеристики КС від технологічної схеми включення газоперекачувальних агрегатів (ГПА) і швидкості обертання їх роторів.

Для побудови стаціонарної характеристики лінійної ділянки використано основне рівняння газопроводів. Для складних ГТС використовується поняття еквівалентного діаметра. Характеристика лінійної ділянки представляє собою залежність між тисками на початку і в кінці та витратою газу

$$P_{Hj} - P_{Kj} = c_j Q^2. \quad (1)$$

Коефіцієнт  $c_j$  в загальному є величиною змінною, оскільки залежить від коефіцієнта гідравлічного опору і середньої температури, які в свою чергу залежать від витрати газу. Тому для побудови характеристики лінійної ділянки використовується ітераційний метод [2].

Характеристика компресорної станції залежить від характеристик газоперекачувальних агрегатів, швидкості обертання їх роторів і технологічної схеми їх роботи. На основі двочленного рівняння характеристики ГПА рівняння характеристики КС має вигляд [3, 4]

$$P_{H_j} = A_j P_{B_j} - \bar{B}_j Q^2. \quad (2)$$

Сумісна реалізація характеристик лінійної частини і КС для газотранспортної системи з  $n$  лінійних ділянок дає можливість знайти пропускну здатність

$$Q = \sqrt{\frac{\prod_{j=1}^n A_j P_{B_j}^2 - P_k^2}{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^n A_{j+1} (\bar{B}_j + C_j)}}. \quad (3)$$

Запропонований підхід покладено в основу стратегії раціонального керування режимами системи при трубопроводному транспорті з точки зору мінімізації енерговитрат.

Для прогнозування режимів роботи газотранспортної системи в умовах частой зміни продуктивності необхідно розробити особливі методи розрахунку, які б характеризувалися достатньою точністю і високою швидкістю реалізації за умов різкої зміни параметрів [5, 11].

Зв'язки між параметрами процесів настільки складні і важко простежуються, що для кожного випадку треба проводити розрахунок з урахуванням нелінійності, 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 [6, 7]. 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.

**Дослідження.** Узагальнюючи викладене, слід зробити висновок про необхідність прогнозування стаціонарних процесів у складних газотранспортних системах великої протяжності, що включають значну кількість компресорних станцій.

На основі дослідження стаціонарних режимів роботи газотранспортної системи при частій зміні обсягів перекачування газу запропоновано принцип побудови математичних моделей для оперативного

керування ГТС. В основу моделей покладено метод інтегральних коефіцієнтів впливу, які визначаються за параметрами попередніх режимів. Це дозволяє оперативно визначити тиски і витрати газу в будь-якій точці системи.

Застосування методів інтегральних коефіцієнтів впливу економлять машинний час розрахунку і виявляються досить ефективними для складних газотранспортних систем без компресорних станцій, або на ділянках мережі між компресорними станціями. Процеси, що спостерігаються на входах і виходах системи транспорту газу, інтегрально враховують параметри трубопроводу (довжину, діаметр, гідравлічний опір тощо). Використовуючи поняття про коефіцієнти впливу, вдається отримати співвідношення, що значно спрощують аналіз роботи системи транспорту газу.

Припустимо, що на усіх входах і виходах газопровідної системи підтримуються нульові умови, тобто  $p_1^2, p_2^2, \dots, p_n^2 = 0$ . В цьому випадку зміна витрат у вузлах трубопроводу також відсутня. Для того, щоб зв'язок  $q_1^2 = p_2^2 = \dots = p_n^2 = 0$  був лінійним, використовуємо квадрати тиску і пропускної спроможності. Якщо в деякій точці трубопроводу станеться одиничний стрибок квадрата тиску від  $p_0^2 = 0$  до  $p_{01}^2$ , то в усій внутрішній області спостерігатиметься деяке підвищення тиску, а на усіх входах і виходах системи через деякий час зросте витрата, яка визначається характеристикою системи. Отримані при цьому функції  $Q_{ij}^2$  будемо називати коефіцієнтами впливу за витратою.

На діючому газопроводі завжди підтримуються певні тиски на усіх входах і виходах, тому коефіцієнти впливу необхідно визначати за нульових граничних умов [3, 9]. При тиску на входах і виходах газопроводу  $p_1^2, p_2^2, p_3^2, \dots, p_n^2$  відповідно встановляться деякі квадрати витрат  $q_1^2, q_2^2, q_3^2, \dots, q_n^2$ .

При зміні тиску на першому вході або виході  $\Delta p_1^2 = p_1^2 - p_{11}^2$  через певний час спостерігатимуться нові квадрати витрат  $q_{11}^2, q_{21}^2, q_{31}^2, \dots, q_{n1}^2$ .

При зміні квадрату тиску на величину  $\Delta p_1^2$  коефіцієнт впливу на першому вході або виході за пропускною спроможністю описується рівнянням

$$Q_{1j}^2 = \frac{q_{j1}^2 - q_j^2}{p_1^2 - p_{11}^2} = \frac{\Delta q_j^2}{\Delta p_1^2}. \quad (4)$$

Аналогічно визначаються коефіцієнти впливу за витратою для усіх інших входів і виходів системи. Коефіцієнти впливу є приростами квадратів витрат на кожному вході або виході, віднесені до значення стрибка квадрата тиску в точці збурення.

Функція впливу дає можливість аналізувати нестационарні процеси в цій системі. Якщо задаватися не тиском, а пропускною спроможні-

стю газотранспортної системи, то відношення змін квадратів тисків на входах і виходах системи до довільного стрибка квадратів витрати на вході дає систему коефіцієнтів впливу за тиском

$$p_{1j}^2 = \frac{p_{j1}^2 - p_j^2}{q_1^2 - q_{11}^2} = \frac{\Delta p_j^2}{\Delta q_1^2}. \quad (5)$$

Матриці коефіцієнтів за тиском і пропускною здатністю між собою взаємопов'язані і характеризують систему транспорту газу як технологічний об'єкт, що підпорядковується керуючим впливам. Для стаціонарних режимів роботи газопроводів, що описуються в загальному випадку рівняннями Лапласа, формула Гріна записується у вигляді

$$\sum_{i=1}^n (q_i^2 \Delta p_i^2 - p_i^2 \Delta q_i^2) = 0, \quad (6)$$

де  $\Delta p_i^2 = P_{i1}^2 - P_i^2$ ,  $\Delta q_i^2 = q_{i1}^2 - q_i^2$ .

Звідси одержимо формулу для визначення квадрата витрати на будь-якому  $j$ -тому вході або виході при збуреннях на  $n$  входах або виходах

$$q_j^2 = \sum_{i=1}^n P_i^2 Q_{ji}^2 \quad (7)$$

і формулу для визначення квадрата тиску

$$p_j^2 = \sum_{i=1}^n q_i^2 P_{ji}^2. \quad (8)$$

Коефіцієнти впливу можуть бути визначені за експлуатаційними даними [4, 5]. Для знаходження матриці коефіцієнтів доводиться вдаватися до визначення зміни тиску і продуктивності в декількох діапазонах часу  $T_1, T_2, T_3 \dots, T_n$ .

Для інтервалів часу  $T_1, T_2, T_3 \dots, T_n$  вимірюємо витрати і тиски на входах і виходах системи і знаходимо їх квадрати  $[q_i]^2$  і  $[p_i]^2$ . Використавши формули (7) і (8), отримаємо систему рівнянь

$$[q_i]^2 = \sum_{j=1}^n [p_j]^2 Q_{ji}^2.$$

З якої знаходимо коефіцієнти впливу за витратою. З виразу

$$[p_j]^2 = \sum_{i=1}^n [q_i]^2 P_{ji}^2 \text{ знаходимо величину } p_{ji}.$$

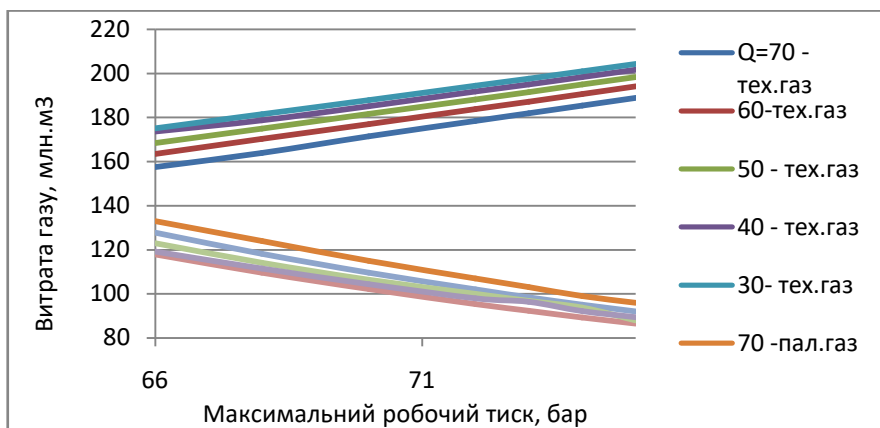
Оптимізація режимів роботи газотранспортної системи в умовах її роботи з неповним завантаженням має свої особливі підходи і принципи їх реалізації. Особливості процедури стосуються в першу чергу розширення області допустимих режимів і відповідно вибору технологічних схем і обладнання газотранспортної системи, адже при суттєвому зменшенні продуктивності експлуатація можлива при зменшенні числа працюючих компресорних станцій чи кількості працюючих газоперекачувальних агрегатів на кожній з них. Єдиними критеріями оптималь-

ності режимів роботи може служити мінімум енерговитрат на транспортування газу і максимум надійності газопроводу. Керуючись першим з цих критеріїв, слід вибрати принцип оптимізації режимів з вказаної множини допустимих.

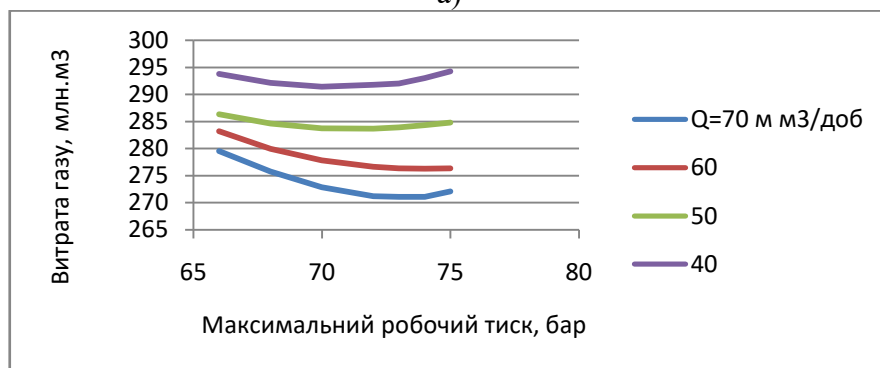
Затрати газу на транспорт можна розділити на витрати паливного газу для приводу ГПА, які пропорційні його потужності, і витрати технологічного газу для підтримання тиску в трубопроводах.

Енерговитрати на транспорт можна виразити в еквівалентних обсягах газу. Тоді мінімум енерговитрат відповідатиме мінімуму сумарних витрат газу, які є сумою паливного і технологічного газу. Збільшення кількості технологічного газу в трубах призводить до зростання робочих тисків, а, значить, до зменшення енергетичних втрат при транспорті, отже, до зменшення витрати паливного газу. Тому при оптимальному режимі сума витрат паливного і технологічного газу має мінімум.

Запропонований принцип оптимізації режимів реалізується методом конкуруючих варіантів, які відрізняються максимальними робочими тисками. Як приклад приведено оптимізацію режимів газопроводу СОЮЗ при заданій продуктивності (рис. 1).



а)



б)

Рис. 1. Залежність витрат паливного і технологічного газу (а) та сумарних витрат газу (б) від максимального робочого тиску

Керування режимами газотранспортної системи зводиться до керування режимами роботи компресорних станцій, враховуючи можливість їх експлуатації чи тимчасової зупинки.

Принцип раціонального керування режимом роботи КС можна сформулювати наступним чином: при заданому обсязі транспорту газу  $Q$  і фіксованих граничних умовах (тиск на вході  $P_B$  і виході  $P_H$  та температурі газу на вході  $T_B$ ) слід визначити таке поєднання машин, оберти ротора агрегату, щоб забезпечити мінімум енергетичних витрат по КС

$$F = \min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f_{ij}(r, u),$$

враховуючи обмеження

$$P_H < P_H^{\max}; T_H < T_H^{\max}; n_{i\min} < n_i < n_{i\max}; N_{ij} < N_{ij}^{\max},$$

де  $u$  – вектор керування, компонентами якого є параметри: число обертів і агрегатів;  $r$  – вектор режимів, який визначається робочим тиском, витратою і температурою газу;  $m$  – число паралельних груп агрегатів,  $s$  – число послідовних ступенів;  $N_{ij}^{\max}$ ,  $T_H^{\max}$ ,  $P_H^{\max}$  – максимальні значення відповідно потужності, температури і тиску на виході;  $n_{i\min}$ ,  $n_{i\max}$  – мінімальні і максимальні допустимі оберти роторів нагнітачів.

Принцип раціонального керування режимами роботи багатоцехових компресорних станцій з різнотипними газоперекачувальними агрегатами з метою мінімізації енерговитрат зводиться до рівномірного розподілу енергонавантаження між цехами і при цьому забезпечення роботи кожного з агрегатів в режимі, близькому до номінального.

Якщо компресорна станція складається з  $i_1$  паралельно і  $j_1$  послідовно діючих цехів ( $i_1 = \overline{1, n}$ ;  $j_1 = \overline{1, m}$ ), які відрізняються різними типами нагнітачів, то обмеження у них різні (наприклад, границі регулювання за обертами, максимально допустимі потужності агрегатів, діапазон зміни об'ємної продуктивності відцентрових нагнітачів). Сукупність цих обмежень визначає область допустимого керування.

У загальному випадку для складної багатоцехової компресорної станції ставиться завдання при наступних додаткових умовах

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k_1=1}^{k_r} q_{i k_1}^{(i)} = Q_i; \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad k_i = 1, 2, \dots, k_r,$$

$$\sum_{j_1=1}^m \sum_{s_1=1}^{s_p} \Delta P_{j_1 s_1}^{(i)} = P_H^{(i)} - P_B^{(i)} = \Delta P_i; \quad j_1 = 1, 2, \dots, m; \quad s_1 = 1, 2, \dots, s_p$$

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \dots = \Delta P_n$$

де  $Q_i$  – величина потоку газу в  $i$ -тій групі  $j$ -го цеху;  $\Delta P_{j_1, s_1}$  – підвищення тиску на  $s_1$ -го ступеня  $j_1$ -го цеху.

Функціонал, що мінімізується, при цьому складатиметься з суми енерговитрат на компримування газу по всіх цехах

$$F_i(r, u)_{Q_i} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m F_{i,j}^{(i)}(r, u).$$

Таким чином, завдання розрахунку оптимального варіанту роботи багатоцехової компресорної станції є завданням пошуку оптимального плану розподілу навантажень між окремими її цехами. При цьому слід виходити з мінімуму сумарних енергетичних витрат з урахуванням відповідних технологічних обмежень. Задача вирішується зниженням розмірності функціоналу методом послідовного наближення і подальшого розрахунку одновимірною завдання оптимізації КС за логіко-комбінаторним методом.

**Висновок.** На основі результатів проведених досліджень вирішено важливу науково-технічну задачу раціонального керування принципами експлуатації газотранспортних систем за умови їх неповного завантаження з метою забезпечення заданої на певному проміжку часу продуктивності при мінімальних енерговитратах.

Запропоновано принцип оптимізації режимів роботи газотранспортних систем в умовах неповного їх завантаження за критерієм мінімуму енерговитрат на транспортування газу. Вирішено задачу керування технологічним режимом роботи компресорної станції, яка полягає в підтриманні заданого тиску нагнітання при оптимальному розподілі навантаження між агрегатами. Для багатоцехових КС, обладнаних різно-типовими ГПА, оптимальним розподілом навантаження між цехами слід вважати такий розподіл потужностей, який забезпечує мінімум енерговитрат на компримування заданого обсягу газу при відповідних граничних умовах на вході і виході станції. Встановлено форму та зміст критерію оптимальності, наведено математичний апарат для практичної реалізації задачі.

### *Література*

1. Грудз В.Я., Грудз В.Я. (молодший) Удосконалення методу діагностування витоків з газопроводу на основі дослідження процесу розповсюдження збурень. Прикарпатський вісник НТШ. Число. – 2017. – №1(37). – С.217–225.
2. Грудз В.Я., Грудз В.Я. (молодший) Детерміновані методи оптимізації експлуатаційних режимів газотранспортних систем. Прикарпатський вісник НТШ. Число. – 2017. – №2(38). – С.236–246.
3. Крижанівський Є.І., Грудз В.Я., Грудз В.Я. (молодший) Терещенко Р.В. Прогнозування стаціонарних режимів роботи систем газопостачання методом інтегральних коефіцієнтів. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2019. – №2 (71). – С. 71 – 76.
4. Крижанівський Є.І., Грудз В.Я., Грудз В.Я. (молодший) Терещенко Р.В., Говдяк Р.М. Оптимізація режимів компресорних станцій за умо-



- ви їх неповного завантаження. // Нафтогазова енергетика. – 2019. – №1(31). – С. 36-42.
5. Грудз В.Я., Грудз В.Я. (молодший) Нестационарні процеси в газотранспортних системах за умови їх неповного завантаження. // Матеріали 6-тої Міжнародної науково-технічної конференції «Нафтогазова енергетика-2017». Івано-Франківськ, 15-19 травня 2017. – С.213.
  6. 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). – P. 22-28.
  7. Zapukhliak V. Mathematical modeling of unsteady gas transmission system operating conditions under insufficient loading [Text] / 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.
  8. Костів Я. В. Розробка методів керування складною газотранспортною системою при різних режимах завантаження. МНПК «Нафтогазова енергетика-2015». м. Івано-Франківськ, 15-19.05.2017. – С. 272-273.
  9. Тимків Д. Ф., Заєць В. О., Костів Я. В. Газодинамічні розрахунки технологічних показників експлуатації багатопластових газосховищ (на прикладі пролетарського). Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – № 3(2). – С. 20-24.
  10. Тимків Д. Ф., Костів Я. В. Раціональне керування газотранспортним комплексом з урахуванням підземних сховищ газу. «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання». Зб. Тез доп. науково-практ. конф. студентів і молодих вчених. – Івано-Франківськ, 24-25 листопада 2015. –С.107-108.
  11. Тимків Д. Ф., Костів Я. В. Розробка концепції підвищення ефективності роботи підземних сховищ газу. Прикарпатський вісник НТШ. Число. – 2016. – №1. – С. 261-271.

*Стаття надійшла до редакційної колегії 12.10.2022 р.*

## **PRINCIPLES OF OPTIMIZING CONTROL OF GAS TRANSPORTATION SYSTEMS UNDER CONDITIONS OF THEIR UNDERLOAD**

**V. Ya. Grudz, Ya. V. Grudz, V. R. Protsiuk, V. P. Pidluskyi,  
O. M. Portechyn, B. I. Gershun**

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;  
15, Carpathian st., Ivano-Frankivsk, 76019;  
e-mail: srgg429@gmail.com*

*The work is devoted to establishing the regularities of the flow of technological processes in gas transportation systems to optimize the operation-*

*al management of operating modes under the condition of their incomplete loading.*

*On the basis of the study of the stationary modes of operation of the gas transportation system with changes in the volume of gas pumping, the principle of building a mathematical model based on the superposition of the characteristics of linear sections and compressor stations is proposed, which makes it possible to estimate the throughput of the system, parameters of the operating mode, and energy consumption for gas transportation.*

*The methods of building a system of integral influence coefficients for gas transportation systems in order to evaluate the parameters of its operation in stationary modes of operation are presented. Each change in the technological parameters of the operating mode at the entrance of the gas transport system will necessarily cause a reaction of the system, which will manifest itself in a change of the corresponding parameters at its exit. It is obvious that the input and output parameters of the system are interconnected by a complex system of equations, the implementation of which requires certain time costs and the collection of additional information about the technical and hydro-gas-dynamic conditions of the system at each moment of time. In the conditions of incomplete loading of the gas transportation system, which involves frequent changes in its operation modes, the implementation of the task is not always possible. It is proposed to create a system of integral influence coefficients that characterize the ratio of input and output information in various stationary modes and to formally present it in a matrix form.*

*On the basis of the research results, the principle of optimizing the operation modes of the gas transportation system under conditions of partial loading according to the criterion of minimum energy consumption for gas transportation at the maximum level of gas supply reliability is proposed.*

**Keywords:** *gas transportation system, partial load, compressor station, gas pumping unit, optimization of modes.*