

---

# БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

---

## CONSTRUCTION AND CIVIL ENGINEERING

УДК 621.643

DOI <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.1.22>

### РАЦІОНАЛЬНІ РЕЖИМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ГАЗОТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОГО ОБСЯГУ ТРАНЗИТУ ГАЗУ

---

**Чернова О.Т.** – кандидат технічних наук,  
доцент кафедри газонафтопроводів та газонафтосховищ  
Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу  
ORCID ID: 0000-0002-6424-7569

**Грудз В.Я.** – доктор технічних наук,  
професор кафедри газонафтопроводів та газонафтосховищ  
Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу  
ORCID ID: 0000-0003-1182-2512

**Гершун Б.І.** – аспірант кафедри газонафтопроводів та газонафтосховищ  
Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу  
ORCID ID: 0000-0001-9353-5327

*Оптимізація режимів роботи газотранспортної системи в умовах її роботи з неповним завантаженням має свої особливі підходи і принципи їх реалізації. Особливості процедури оптимізації стосуються насамперед розширення сфери допустимих режимів і відповідно вибору технологічних схем і обладнання газотранспортної системи, адже у разі суттєвого зменшення продуктивності експлуатація можлива за зменшення числа працюючих компресорних станцій чи кількості працюючих газоперекачувальних агрегатів на кожній з них. В умовах неповного завантаження газотранспортної системи суттєве зниження продуктивності (порівняно з пропускною здатністю) призводить до розширення діапазону зміни максимального і мінімального тисків. Гранічними варіантами допустимих режимів слід вважати такі: максимальний, що характеризується максимальним значенням тиску на початку лінійної ділянки, і мінімальний, що характеризується мінімальними значенням тиску в кінці лінійної ділянки. Множина всіх решти допустимих режимів перебуває в діапазоні між вказаними граничними. Слід зауважити, що в умовах неповного завантаження газотранспортної системи єдиними критеріями оптимальності режимів роботи можуть служити мінімум енергозатрат на транспортування газу і максимум надійності газопроводу. Керуючись першим з цих критеріїв, можна вибрати принцип оптимізації режимів з вказаної множини допустимих. Другий критерій встановлює оптимальні принципи обслуговування технологічного обладнання та газопроводів газотранспортного комплексу. З метою їх практичної реалізації необхідно виробити стратегічні напрями і методи оптимізації режимів і обслуговування газотранспортної системи в умовах неповного завантаження.*

**Ключові слова:** трубопровідний транспорт, експлуатація, технологічні схеми, оптимізація режимів роботи, компресорні станції.

---

***Chernova O. T., Hrudz V. Ya., Hershun B. I. Optimization of gas transmission systems regimes in the conditions of their uncomplete loading***

*Optimization of operating modes of the gas transmission system in the condition when it works with partial loading has the special approaches and principles of their realization. Features of the optimization procedure relate primarily to expanding the range of permissible modes and choice of technological schemes and equipment of the gas transmission system as with a significant reduction in productivity operation is possible by reducing the number of operating compressor stations or the number of operating gas pumping units. In the conditions of incomplete loading of gas transmission system essential decrease in productivity in comparison with throughput leads to expansion of range of change of the maximum and minimum pressures. The following should be considered as limit variants of admissible modes: the maximum – characterized by the maximum value of the pressure at the beginning of the linear section, and the minimum – characterized by the minimum value of the pressure at the end of the linear section. The set of all other valid modes is in the range between the specified limits. It should be noted that in the conditions of incomplete loading of the gas transmission system, the only criteria for the optimality of operating modes can be the minimum energy consumption for gas transportation and the maximum reliability of the pipeline. Guided by the first of these criteria, you can choose the principle of optimization of modes from the specified set of valid. The second criterion establishes the optimal principles of maintenance of technological equipment and gas pipelines of the gas transmission complex. For the purpose of their practical realization it is necessary to develop strategic directions and methods of optimization of modes and service of gas transmission system in the conditions of incomplete loading.*

**Key words:** pipeline transport, operation, technological schemes, optimization of operating modes, compressor stations.

Оптимізація режимів роботи газотранспортної системи в умовах неповного завантаження вимагає насамперед мінімізації енерговитрат на транспортування газу. Враховуючи енергетичні характеристики природного газу як енергоносія, критерій енергоефективності можна виразити в обсягах газу, затрачених на його транспортування. До таких затрат газу слід віднести паливний газ, який витрачається на компресорних станціях для приводу газоперекачувальних агрегатів і обсяг якого залежить від режиму роботи ГПА, та технологічний газ, що знаходиться безпосередньо в трубопроводах для підтримання тиску, необхідного для нормальної роботи КС, обсяг якого також залежить від режиму роботи системи. Тому врахування витрати газу за різних експлуатаційних режимів, у тому числі вартості паливного та технологічного газу, є одним з економічних показників експлуатаційного режиму з енергетичної точки зору.

Газотранспортна система здебільшого має складну геометричну структуру: багатьох ниток, з'єднаних перемичками; лупінги; складні за структурою відгалуження до споживачів. Енергетичними об'єктами є компресорні станції (КС), які мають цехи з різними типами ГПА з різними характеристиками. Тому можна розглядати їх роботу за типами працюючих ГПА, за схемою їх спільної роботи, а також за режимами роботи кожного агрегату. Це зумовлює багатоваріантність режимів роботи та широке коло для оптимізації.

Наукові розробки для розрахунку складних газопроводів [13; 14; 15] присвячені стаціонарним режимам транспортування газу. Якщо використовувати теорію складних систем [3], то можна розраховувати режими магістральних газопроводів практично будь-якої конфігурації без значного збільшення обсягів розрахунків. Проблеми визначення фактичних гідродинамічних параметрів газопроводів із урахуванням теплофізичних властивостей газів мають місце в [2; 7]. Праці з цього питання ґрунтуються тільки на стаціонарних режимах або нестаціонарних процесах без обліку змінності властивостей середовища [12; 16]. Використання методик цих досліджень для розрахунку систем магістрального транспорту газу може призвести до неприпустимих помилок. У зв'язку з цим виникає потреба в розробці

простих і водночас досить точних методів ідентифікації параметрів газотранспортної мережі.

Більшість наукових праць присвячено в основному стаціонарним режимам транспортування газу. Сучасні умови експлуатації вимагають нового підходу. Важливою проблемою залишається визначення фактичних гідродинамічних параметрів газопроводів з урахуванням теплофізичних властивостей газів та зміною властивостей середовища.

Виникає потреба в розв'язанні задачі досить загального характеру, а саме: створення методів розрахунку неусталених неізотермічних режимів транспортування газу складними взаємопов'язаними газотранспортними магістралями з використанням підземних газосховищ. Виходячи з практики роботи складної газотранспортної системи, слід проводити облік зміни параметрів трубопровідних систем і транспортованого газу в часі та просторі залежно від зміни граничних умов і неізотермічності перекачки газу. Це значно ускладнює розрахунки процесів гідравліки та теплообміну в газотранспортних системах.

Якщо газотранспортна система складається з декількох паралельних ниток, то в умовах неповного завантаження системи розподіл газопотоків між нитками буде нерівномірним, що вимагає розрахунку оптимального завантаження кожної з паралельних ниток. Розрахунок ведеться методом ітерацій за відомої величини абсолютної похибки у визначенні сумарної витрати газу та витрати в кожній з паралельних ниток  $\delta Q$ . В основу розрахунку покладено модель стаціонарного руху газу в трубах, зокрема основне рівняння газопроводів.

Знаючи кількість працюючих компресорних станцій на кожній з паралельних ниток газотранспортної системи, тиски і температури на вході і виході кожної з них і їх продуктивність за такого режиму, можна визначити витрату паливного газу по кожній КС і системі загалом за однією з відомих методик [11; 21].

Для розрахунку запасів газу в трубах використовується інформація, що отримана у разі реалізації задачі про розподіл витрати газу між паралельними нитками складної газотранспортної системи. Вихідна інформація для кожної ділянки задається у вигляді:

- абсолютних значень тисків газу на початку  $P_{Hi}$  і в кінці  $P_{Bi+1}$  ділянки (ата);
- абсолютних температур газу на початку  $T_{Hi}$  і в кінці  $T_{Bi+1}$  ділянки (К);
- геометричних характеристик лінійних ділянок: внутрішній діаметр  $d_i$  (мм) і довжина  $L_i$  (км) ділянки;
- геометричних характеристик обв'язки КС: геометричний об'єм трубопроводів і обладнання на низькій стороні  $V_{Bi}$  та геометричний об'єм трубопроводів і обладнання на високій стороні  $V_{Hi}$  ( $M^3$ );
- відносної густини  $\varnothing$ ;
- середніх значень тисків  $P_{cpi}$  і температур газу  $T_{cpi}$ , а також коефіцієнта стисливості  $Z_{cpi}$  як результатів реалізації задачі.

Кількість газу в кожній з паралельних ниток газотранспортної системи на кожній з ділянок між компресорними станціями з номерами  $i$  та  $i+1$  знаходиться за стандартних умов ( $P_c=1$  ата,  $T_c=293$  К) з формули:

$$W_{ij} = \frac{\pi d_{ij}^2}{4} L_i \frac{P_{cpi}}{P_c} \frac{T_c}{T_{cpi}} \frac{1}{Z_{cpi}}$$

Сумарний об'єм газу в лінійній частині газотранспортної системи

$$W_{ли} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k W_{ij}$$

де  $k$  – кількість лінійних ділянок.

Кількість газу в обв'язці кожної з компресорних станцій  
– на низькій стороні

$$W_{Bj} = V_{\text{geom}B} \frac{P_{Bi}}{P_c} \frac{T_c}{T_{Bi}} \frac{1}{Z_{Bi}}$$

– на високій стороні

$$W_{Hj} = V_{\text{geom}H} \frac{P_{Hi}}{P_c} \frac{T_c}{T_{Hi}} \frac{1}{Z_{Hi}}$$

Сумарна кількість газу в обв'язках КС

$$W_{KC} = \sum_{j=1}^k (W_{Bj} + W_{Hj})$$

Витрата паливного газу визначається за потужністю працюючих газоперекачувальних агрегатів на КС і нормами витрати палива на одиницю потужності.

$$Q_{\text{ПГ}} = Q_{\text{ПГ}} \tau = N_{KC} q_{\text{нор}} \tau$$

де:  $Q_{\text{ПГ}}$  – витрата паливного газу протягом часу експлуатації  $\tau$ ;  $N_{KC}$  – ефективна потужність ГПА;  $q_{\text{нор}}$  – норма витрати паливного газу на одиницю потужності для такого типу ГПА.

Індикаторна зведена потужність ГПА

$$\left[ \frac{N_i}{\rho_B} \right]_3 = c_0 + c_1 (Q_B / \bar{n}) + c_2 (Q_B / \bar{n})^2$$

де:  $Q_B$  – об'ємна продуктивність ГПА за умов входу;  $\bar{n}$  – відносні оберти ротора; – апроксимаційні коефіцієнти.

$c_i$  – Ефективна потужність працюючих ГПА на КС

$$N_{KC} = \sum_{j=1}^n (N_{ij} + \Delta N_{Mj})$$

де:  $N_{ij}$  – індикаторна потужність ГПА для КС з номером  $j$

$$N_{ij} = \left[ \frac{N_i}{\rho_B} \right]_{3j} \rho_B \bar{n}^3$$

$\rho_{Bj}$  – густина газу за умов входу в ГПА

$$\rho_{Bj} = \frac{P_{Bj}}{z_{Bj} R T_{Bj}}$$

$P_{Bj}$ ,  $T_{Bj}$  – тиск і температура на вході ГПА  $J$ -тої КС.

Сумуючи витрати паливного та технологічного газу для кожного з конкуруючих режимів експлуатації газотранспортної системи в умовах неповного завантаження, отримаємо критерій, який характеризує такий режим з точки зору його енергоефективності. Мінімальні витрати паливного і технологічного газу відповідатимуть оптимальному режиму експлуатації газотранспортної системи в умовах неповного завантаження.

Запропонований принцип оптимізації режимів реалізований методом конкуруючих варіантів, які відрізняються максимальними робочими тисками, для оптимізації режимів газопроводу СОЮЗ за заданої продуктивності. Результати процедури у вигляді графіків наведено на рисунках 1, 2.

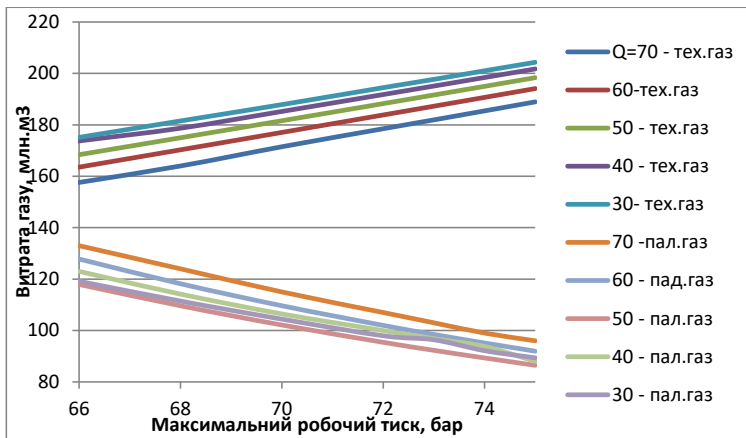


Рис. 1. Витрати паливного і технологічного газу залежно від робочого тиску за різних ступенів завантаження газопроводу СОІУЗ

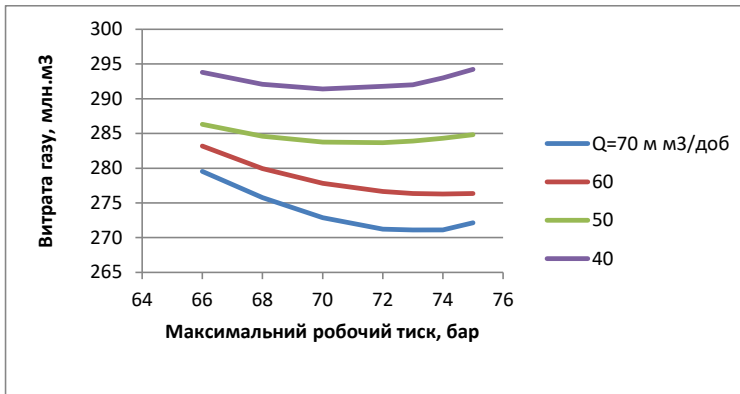


Рис. 2. Залежність сумарних витрат газу від робочого тиску за різних ступенів завантаження газопроводу СОІУЗ

Аналіз отриманих залежностей дає підстави стверджувати, що наявне оптимальне значення робочого тиску на виході КС, якому відповідає мінімум енерговитрат на транспортування газу. Збільшення кількості технологічного газу в трубах призводить до зростання робочих тисків, а, значить, до зменшення енергетичних витрат під час транспортування, отже, до зменшення витрати паливного газу. Тому за оптимального режиму сума витрат паливного і технологічного газу має мінімум.

Запропоновані методи базуються на використанні стохастичних математичних моделей з використанням як вихідної інформації передісторії експлуатації газоперекачувальних агрегатів на компресорних станціях, для їх реалізації необхідно оцінити реальний технічний стан кожного ГПА і прогнозувати його залишковий ресурс та ймовірність безвідмовної роботи.

Проведені розрахунки даватимуть змогу прийняття конкретних техніко-економічних рішень, які стосуються характеру подальшого обслуговування обладнання компресорних станцій, вибору стратегій контролю параметрів технічного стану, планування профілактичних ремонтів або заміни газоперекачувальних агрегатів.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:**

1. Говдяк Р.М., Семчук Я.М., Чабанович Л.Б. та ін. Енергоекологічна безпека нафтогазових об'єктів. Івано-Франківськ : Лілея НВ, 2007. 554 с.
2. Грудз В.Я., Грудз В.Я. (молодший). Детерміновані методи оптимізації експлуатаційних режимів газотранспортних систем. *Прикарпатський вісник НТШ*. 2017. № 2(38). С. 236–246.
3. Грудз В.Я., Грудз Я.В., Костів В.В. та ін. Технічна діагностика трубопровідних систем. Івано-Франківськ : Лілея-НВ. 2012. 512 с.
4. Грудз В.Я., Грудз Я.В., Слободян В.І. Енергетична ефективність використання високопотужних газоперекачувальних агрегатів на компресорних станціях багатоніткових систем. *Нафтогазова енергетика*. 2010. № 2. С. 30–33.
5. Грудз Я.В. Оптимізація режимів роботи газопроводу з урахуванням енерговитратності транспорту газу. *Нафтогазова енергетика*. № 2. 2012. С. 12–15.
6. Грудз В.Я., Середюк М.Д. Оптимізація режимів роботи газонафтогазотранспортних систем України в умовах їх неповного завантаження. *Тези доповіді в комітеті з енергозбереження Верховної Ради*. 2015.
7. Грудз В.Я., Грудз Я.В., Слободян В.І. та ін. Дослідження енергетичного стану складних газотранспортних систем. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Шляхи підвищення ефективності експлуатації трубопровідного транспорту нафти і газу та підготовка кадрів для галузі»*. Івано-Франківськ. 2010. С. 9–12.
8. Крижанівський Є.І., Грудз В.Я., Грудз В.Я. (молодший), Терещенко Р.В. Оптимізація режимів компресорних станцій за умови їх неповного завантаження. *Нафтогазова енергетика*. 2017. № 1(27). С. 65–69.
9. Grudz V.Ya., Grudz V.Ya. (junior), Zapukhlyak V.B., Kyzumyshyn Ya.V. Non-stationary processes in the gas transmission systems at compressor stations shut-down. *Journal of hydrocarbon power engineering*. 2018. № 1(5). P. 22–28.
10. Filipchuk V., Grudz V., Marushchenko V., Myndiuk M., Savchuk M. Development of cleaning methods complex of industrial gas pipelines based on the analysis of their hydraulic efficiency. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. ISSN 1729-3774. № 2/8 (92). 2018.
11. Energy Charter Secretariat. Gas Transit Tariffs in selected Energy Charter Treaty Countries. January 2006. 86 p. URL: [www.encharter.org](http://www.encharter.org).
12. Чернова О.Т. Газотранспортна система України: модернізація та переоснащення. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. № 1 (38). 2015. С. 77–83.
13. Halyna Zelinska, Irina Fedorovyc, Uliana Andrusiv, Oksana Chernova, Halyna Kupalova. Modeling of the Gas Transmission Reliability as a Component of Economical Security of Ukrainian Gas Transmission System. *Machine Learning for Prediction of Emergent Economy Dynamics : Proceedings of the Selected Papers of the Special Edition of International Conference on Monitoring, Modeling & Management of Emergent Economy (M3E2-MLPEED 2020)*, Odessa, Ukraine July 13–18, 2020. / Arnold Kiv (Ed.) st. 415–433.
14. Мартинюк Р.Т., Чернова О.Т., Шиян М.Р. Аналіз методів і засобів визначення фактичного стану нафтогазопроводів та розрахунок їх залишкового ресурсу. *Прикарпатський вісник НТШ. Івано-Франківський осередок наукового товариства ім. Шевченка*. № 1 (59). 2020. С. 134–142.

**REFERENCES:**

1. Govdyak, R.M, Semchuk, Y.M, Chabanovich, L.B and others. (2007). *Energhoekologichna bezpeka naftoghazovykh ob'ektiv* [Energy and environmental safety of oil and gas facilities]. Ivano-Frankivsk: Lileya-NV, p. 554 [in Ukrainian]
2. Grudz, V.Ya., Grudz, V.Ya. (Junior). (2017). *Determinovani metody optymizaciji ekspluatacijnykh rezhymiv ghazotransportnykh system* [Deterministic methods of

optimization of operational modes of gas transmission systems]. *Prykarpattya Bulletin of the NTSh. Numeric.* No. 2 (38), pp. 236–246.

3. Grudz, V.Ya., Grudz, Ya.V., Kostiv, V.V. and others (2012). *Tekhnichna diagnostyka truboprovodnykh system* [Technical diagnostics of pipeline systems]. Ivano-Frankivsk: Lileya-NV, p. 512 [in Ukrainian].

4. Grudz, V.Ya., Grudz, Ya.V., Slobodyan, V.I. (2010). Energhetychna efektyvnist vykorystannja vysokopotuzhnykh ghazoperekachuvalnykh aghreghativ na kompresornykh stancijakh baghatonytkovykh system [Energy efficiency of high-power gas pumping units at compressor stations of multi-threaded systems]. *Oil and gas energy.* No. 2, pp. 30–33.

5. Grudz, J.V. (2012). Optyimizacija rezhymiv roboty ghazoprovodu z urakhuvannjam energhovytratnosti transportu ghazu [Optimization of gas pipeline modes taking into account the energy consumption of gas transport]. *Oil and gas energy.* No. 2. Pp. 12–15.

6. Grudz, V.Ya., Seredyuk, M.D. (2015). Optyimizacija rezhymiv roboty ghazonaftotransportnykh system Ukrainy v umovakh jikh nepovnogho zavantazhennja [Optimization of operating modes of gas and oil transportation systems of Ukraine in the conditions of their incomplete loading]. *Abstracts of the report in the Committee on Energy Conservation of the Verkhovna Rada, Ukraine:* Kyiv.

7. Grudz, V.Ya., Grudz, Ya.V., Slobodyan, V.I. and others (2010). Research of energy condition of complex gas transmission systems. *Materials of the All-Ukrainian scientific-practical conference “Ways to increase the efficiency of oil and gas pipeline transport and training for the industry”.* Ukraine: Ivano-Frankivsk, pp. 9–12.

8. Kryzhanivsky, E.I., Grudz, V.Ya., Grudz, V.Ya. (Junior), Tereshchenko R.V. (2017). Optyimizacija rezhymiv kompresornykh stancij za umovy jikh nepovnogho zavantazhennja [Optimization of compressor station modes under condition of their incomplete loading]. *Oil and gas energy.* No. 1 (27), pp. 65–69.

9. Grudz V.Ya., Grudz V.Ya. (junior), Zapukhlyak V.B., Kyzymyshyn Ya.V. Non-stationary processes in the gas transmission systems at compressor stations shut-down. *Journal of hydrocarbon power engineering.* 2018. No. 1 (5). P. 22–28.

10. Filipchuk, V., Grudz, V., Marushchenko, V., Myndiuk, M., Savchuk, M. Development of cleaning methods complex of industrial gas pipelines based on the analysis of their hydraulic efficiency *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* ISSN 1729-3774. No. 2/8 (92). 2018.

11. Energy Charter Secretariat. Gas Transit Tariffs in selected Energy *Charter Treaty Countries.* January 2006. 86 p. Retrieved from: [www.encharter.org](http://www.encharter.org).

12. Chernova, O.T. (2015). Ghazotransportna systema Ukrainy: modernizacija ta pereosnashhennja [Gas transportation system of Ukraine: modernization and re-equipment]. *Scientific Bulletin of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas.* No. 1 (38), pp. 77–83.

13. Halyna Zelinska, Irina Fedorovyc, Uliana Andrusiv, Oksana Chernova, Halyna Kupalova. Modeling of the Gas Transmission Reliability as a Component of Economic Security of the Ukrainian Gas Transmission System. *Machine Learning for Prediction of Emergent Economy Dynamics Proceedings of the Selected Papers of the Special Edition of the International Conference on Monitoring, Modeling & Management of Emergent Economy (M3E2-MLPEED 2020),* Odessa, Ukraine July 13–18, 2020. Arnold Kiv, st. 415–433.

14. Martinyuk, R.T., Chernova, O.T., Shiyan, M.R. (2020). Analiz metodiv i zasobiv vyznachennja faktychnogho stanu naftoghazoprovodiv ta rozrakhunok jikh zalyshkovogho resursu [Analysis of methods and means of determining the actual condition of oil and gas pipelines and calculation of their residual life]. *Pre-Carpathian Bulletin of the NTSh. Ivano-Frankivsk branch of the scientific society named after Shevchenko.* No.1 (59), pp.134–142.