

УДК 622.691.063.6-022.252:001.891(477.74)

doi:10.20998/2413-4295.2019.02.01

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГАЗОПРОВОДІВ НА ДІЛЯНЦІ ТАРУТИНЕ-ОРЛІВКА

О. Б. ВАСИЛІВ^{1*}, О. С. ТІТЛОВ¹, А. П. ЛІПІН²

¹кафедра теплоенергетики та трубопровідного транспорту енергоносіїв, Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, УКРАЇНА

²кафедра технологічного обладнання зернових виробництв, Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, УКРАЇНА
^{*}e-mail: oleg_vas@ukr.net

АНОТАЦІЯ У роботі наведено огляд стану транзиту природного газу територією України через газотранспортну систему та розглянуто перспективи подальшого завантаження враховуючи побудову альтернативних обхідних газопроводів. Як об'єкт дослідження вибрано відгалуження ГТС України у південному напрямку, яке проходить через газомірювальну станцію «Орлівка» де здійснюється вимірювання кількості та визначення якості природного газу, що передається. На підставі аналізу даних про нерівномірність транзиту у зазначеному напрямку проведено їх групування за кількісною ознакою та визначено необхідне число інтервалів. Розраховано відносно амплітуду коливань подачі газу та проведені розрахунки показників гідравлічної потужності газопроводів. Встановлено, що коливання максимальної та мінімальної гідравлічної потужності за період з 2015 по 2018 рік змінювалися у межах 8.7-39.5, що свідчить про значні перепади у режимах роботи компресорних станцій та необхідність оптимізації їхньої роботи. На основі огляду літературних джерел з проблеми ефективної роботи газопроводів в умовах недовантаження, розроблена методика визначення пропускної здатності та енерговитратності газопроводу для заданої комбінації працюючих газоперекачуючих агрегатів (ГПА). Розрахунки проводилися для газопроводу Ананьїв–Тирасполь–Ізмаїл на ділянці Тарутине–Орлівка. Методика містить розрахунок фізичних властивостей газу за його складом, розрахунок компримування газу, розрахунок лінійної частини, витрат газу на власні потреби компресорної станції та розрахунок сумарної потужності газоперекачуючих агрегатів при заданих технологічних обмеженнях. За допомогою розробленого оригінального програмного забезпечення у мові програмування MATLAB виконані циклічні багатоваріантні розрахунки пропускної здатності і енерговитратності газопроводу та проведена оптимізація режимів роботи компресорного цеху. За критерій оптимізації вибрана мінімальна сумарна потужність ГПА. Змінними параметрами при цьому є частоти обертання нагнітачів, різні комбінації працюючих ГПА, коефіцієнт завантаженості.

Ключові слова: газотранспортна система; недовантаження; гідравлічна потужність; енерговитратність; оптимізація

RESEARCH GAS PIPELINE OPERATION MODES ON THE "TARUTINE-ORLIVKA" SECTION

O. VASYLIV¹, O. TITLOV¹, A. LIPIN²

¹ Department of Heat-and-Power Engineering and Fuel Pipeline Transport, Odesa National Academy of Food Technologies, Odesa, UKRAINE

² Department of technological equipment of grain production, Odesa National Academy of Food Technologies, Odesa, UKRAINE

ABSTRACT The paper gives an overview of the state of transit of natural gas through the gas transportation system through the territory of Ukraine. Prospects of further loading taking into account the construction of alternative bypass gas pipelines are considered. A branch of the GTS of Ukraine in the south direction, which passes through the gas-measuring station "Orlivka", was selected as a research object. There, the quantity and quality of the natural gas being transmitted are measured. Based on analysis of data on uneven of transit in the specified direction, they were grouped by quantitative characteristic and the required number of intervals was determined. The relative amplitude of gas supply oscillations was calculated and the hydraulic power parameters of gas pipelines were calculated. It is established that the fluctuations of the maximum and minimum hydraulic power for the period from 2015 to 2018 were varied within 8.7-39.5, which indicated significant differences in the modes of operation of the compressor stations and the need to optimize their operation. The relative amplitude of gas supply oscillations was calculated and the hydraulic power parameters of gas pipelines were calculated. On the basis of the review of literature sources on the problem of efficient operation of gas pipelines under conditions of underloading, a technique for determining the capacity and energy consumption of a gas pipeline for a given combination of working gas-pumping units (GPU) was developed. The calculations were carried out for the Ananiev–Tiraspol–Izmail gas pipeline on the Tarutyn–Orlivka section. The methodology includes the calculation of the physical properties of gas in its composition, the calculation of gas compression, the calculation of the linear part and the gas consumption for the compressor station's own needs and the calculation of the total power of the gas-pumping units with the given technological limitations. Using the original software developed in the MATLAB programming language, cyclical multivariate calculations of the capacity and energy consumption of the pipeline were performed and optimization of the compressor shop operating modes. For the optimization criterion, the minimum total capacity of the GPU is selected. Variable parameters at the same time are the speed of rotation of the supercharger, different combination of working GPU, load factor.

Keywords: gas transmission system; underloading; hydraulic power; energy consumption; optimization

Вступ

Україна володіє однією з найбільших в Європі і світі мережею газопроводів (ГТС) з пропускною здатністю на вході 288 млрд.м³ на рік, а на виході – 178,5 млрд.м³ газу на рік. Її довжина становить понад 39,8 тис.км.

ГТС України виконує такі важливі функції, як забезпечення природним газом споживачів в межах

країни, а також транзит газу до європейських держав через територію України.

У зв'язку з побудовою РФ альтернативних обхідних газопроводів («Ямал-Європа», «Північний потік», «Голубий потік») транзит через нашу країну за останні роки значно скоротився і складає близько 40% від загального обсягу поставок [1].

Прогноз попиту на російський газ у ЄС – один з найважливіших факторів при прогнозуванні необхідної потужності для транзиту. Тут можна виділити наступні аспекти [2,3]:

1. Падіння європейського видобутку газу і попиту на газ в ЄС.

2. Співвідношення об'ємів імпорту скрапленого природного газу (*англ.* LNG) на Європейському ринку і мережевого газу на європейському ринку.

3. Політична готовність європейських країн перевищувати певний поріг в залежності від російського мережевого газу.

4. Конкуренція газу і відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в рамках кліматичної стратегії ЄС.

Транзит російського газу через Україну розділений на два напрямки, які не перетинаються один з одним: «південний» і «західний» напрямком транзиту [4].

Південний напрямком (ГВС «Орлівка») забезпечує транзит газу до Румунії, Болгарії, Туреччини і Греції (газопроводи: Шебелинка–Дніпропетровськ–Кривий Ріг–Ізмаїл (ШДКРІ); Роздільне–Ізмаїл (РІ); Ананьїв–Тирасполь–Ізмаїл (АТІ)). До інших країн газ постачається «західним» напрямком. На південному напрямку проходять три газопровідні нитки загальною потужністю 26,8 млрд. м³/рік, з добовою продуктивністю 81,4 млн. м³/рік. Сьогодні транспортується щорічно біля 18 млрд. м³. Більша частина цих об'ємів призначена для Туреччини (біля 12 млрд. м³), в Болгарію і Грецію поступає в середньому по три млрд. м³/рік. Румунія отримує більше одного мільярда кубометрів, але ця країна у середньостроковій перспективі може і відмовитися від імпорту російського газу. З іншої сторони «Газпром» є єдиним постачальником газу в Молдову (2,9 млрд. м³/ в 2018 р.), який вона сьогодні отримує з території України, і альтернативних варіантів тут не існує [4,5].

Першу нитку турецького потоку планується запустити в січні 2020 року. Після запуску цієї нитки турецького потоку потужністю 15,75 млрд. м³/рік Туреччина буде отримувати «свої» об'єми цим напрямком, відповідно південний напрямком українського транзиту буде задіяно лише на 6-7 млрд. м³/рік – для транспортування в Грецію, Болгарію і Румунію. Більше того, Греція і Болгарія через рік-два почнуть отримувати по 1 млрд. м³/рік з Азербайджану. З однієї сторони для цих країн – додаткова версифікація, але з іншої без цих 2 млрд. м³/рік завантаженість коридору зменшується з нинішніх 18 млрд. м³/рік до 4-5 млрд. м³/рік. Таким чином після запуску «Турецького потоку» (перша нитка) завантаженість південного напрямку транзиту через українську ГТС значно зменшується. Це може бути зниження в 2 рази (найбільш оптимістичний сценарій) чи 3-4 рази при найбільш песимістичному сценарію. Також необхідно підтримувати газотранспортну систему в південному напрямку для власних потреб, що ускладнює ситуацію [6].

Мета роботи

Отже, з огляду на те, що транзит газу через ГТС України в майбутньому падатиме, актуальним напрямком досліджень є, зокрема, розробка методу визначення пропускної здатності та енерговитратності експлуатації газопроводів і оптимізація режимів їх експлуатації [7,8].

Об'єктом досліджень вибрано ділянку газопроводу Тарутине–Орлівка з компресорною станцією «Тарутине» («південний напрямок»).

Поставлена мета реалізується через вирішення наступних завдань:

- обробка фактичних даних експлуатації газопроводу АТІ на ділянці Тарутине–Орлівка;
- розробка алгоритму визначення пропускної здатності та енерговитратності газопроводу для заданої комбінації працюючих газоперекачувальних агрегатів (ГПА);
- розробка алгоритму розрахунку режиму роботи компресорної станції (КС);
- розробка оригінального програмного забезпечення визначення пропускної здатності та енерговитратності газопроводу;
- проведення оптимізації режимів експлуатації ділянки Тарутине–Орлівка за критерієм мінімальних витрат потужності.

Методики досліджень

Обчислювальний алгоритм базується на використанні розрахункових формул, які рекомендовані чинними нормами технологічного проектування магістральних газопроводів [9].

Викладення основного матеріалу

Аналіз фактичних режимів експлуатації ділянки. Транзит природного газу через ГВС «Орлівка» протягом 2014-2018 рр. наведено на рис. 1.

Місячні обсяги транзиту природного газу через ГВС «Орлівка» за період 2015-2018 рр. наведені на рис. 2.

З метою систематизації зібраних статистичних даних по транзиту через ГВС «Орлівка» за було проведено групування отриманих даних (рис. 3).

Якщо в основі групування лежить кількісна ознака, то число груп визначають за формулою Стерджесса [10]:

$$n = 1 + 3.322 \lg(N),$$

де N – кількість одиниць сукупності вибірки; n – число груп.

За звітний період кількість одиниць сукупності вибірки $N=1461$.

Виконаємо оцінку виду розподілу даних по добових об'ємах перекачування.

Таким чином, кількість інтервалів складе

$$n = 1 + 3.322 \lg(1461) = 11.54,$$

приймемо 12 інтервалів.

Далі визначимо величину інтервалу

$$h = \frac{Q_{max} - Q_m}{K} = \frac{75187 - 16682}{12} = 4936.$$

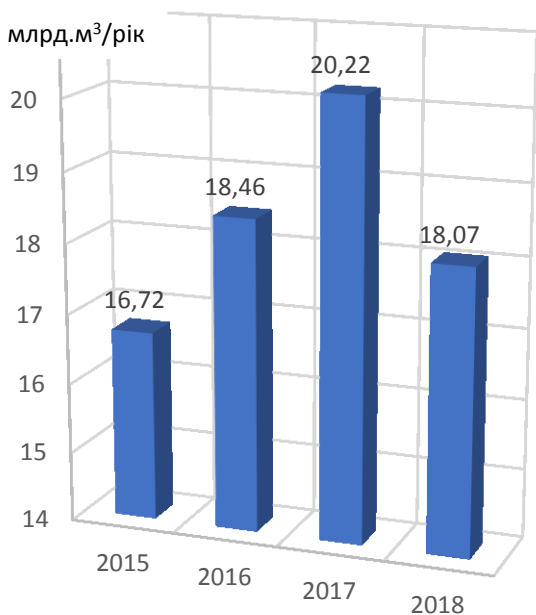


Рис. 1 – Річні обсяги транзиту природного газу через ГВС «Орлівка»

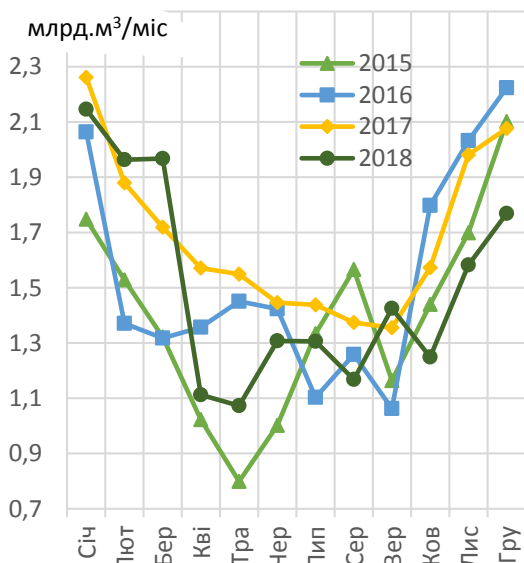


Рис. 2 – Обсяги транзиту природного газу через ГВС «Орлівка» помісячно за період з 2015 по 2018 рр.

Нерівномірність подачі газу по газопроводах протягом року характеризується наступними показниками:

$$\beta = \frac{Q_{max} - Q_m}{Q_m}; \quad \alpha = \frac{Q_{max}}{Q_{min}}; \quad \gamma = \frac{Q_m}{Q_{mmax}}$$

де Q_{max} – максимальна середньодобова подача газу за місяць в розрізі календарного року; Q_m – середньодобова подача газу за рік в цілому; Q_{min} – мінімальна середньодобова подача газу за місяць в розрізі календарного року.

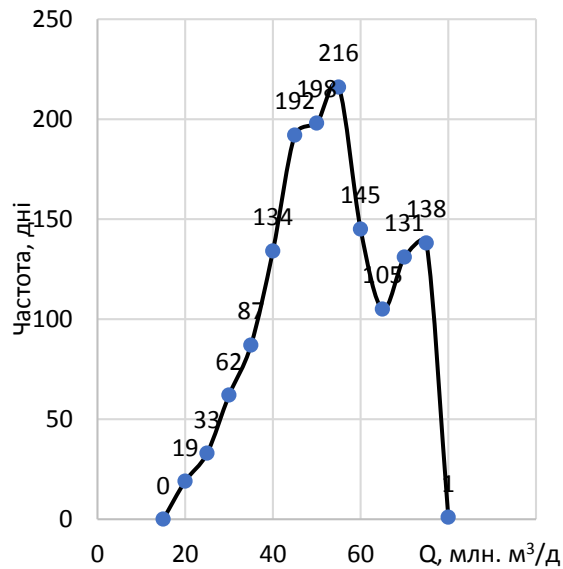


Рис. 3 – Частота розподілу добових обсягів перекачування

В табл. 1 наведений розподіл показників нерівномірності подачі газу через ГВС «Орлівка».

Таблиця 1 – Показники нерівномірності транзиту газу через ГВС «Орлівка»

Показник	2015	2016	2017	2018
Максимальне добове значення транзиту, Q_{max} , тис. м³/міс	70832	73638	74586	75187
Середньодобове значення транзиту, Q_m , тис. м³/міс	45817	50437	55405	49503
Нерівномірність транзиту, β	0.55	0.46	0.35	0.52
Нерівномірність подачі газу, α	4.14	4.41	4.16	4.71
Нерівномірність подачі газу, γ	0.65	0.68	0.74	0.66

Найбільш наочно нерівномірність подачі газу по газопроводах протягом року можна характеризувати коефіцієнтом β , що відображає відносну величину зміни коливань в подачі газу по газопроводу протягом року [11] (рис. 4).

Аналіз роботи різних газопроводів, зокрема ПАТ «Газпром» показує, що чисельне значення відносної амплітуди коливань подачі газу β змінюється в межах 0,08-0,25 та має тенденцію до подальшого росту. Це пов'язано зі збільшеними витратами газу в зимовий період на опалення, не дивлячись на заповнення підземних сховищ газу в літній період.

Натомість, аналіз обсягів транспортування через ГВС «Орлівка» показує, що отримане значення відносної амплітуди коливань подачі газу β значно перевищує дані, наприклад, по ПАТ «Газпром». Мінімальне значення β спостерігалось у 2017 р., оскільки тоді обсяг транзиту був максимальним (рис. 1).

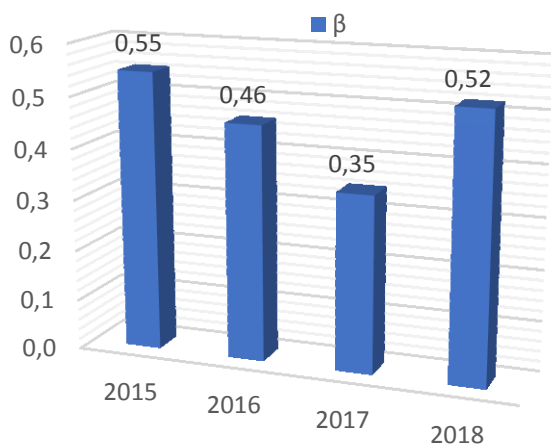


Рис. 4 – Показник нерівномірності транзиту газу В через ГВС «Орлівка»

Нерівномірність подачі газу по газопроводах протягом року описується рівнянням

$$Q = Q_m [1 + \beta \cdot \cos(\varphi - \varphi_0)]; \quad (1)$$

$$\varphi = 2\pi \cdot \frac{\tau}{12}; \quad \varphi_0 = 2\pi \cdot \frac{\tau_0}{12};$$

де φ_0 – зсув по фазі на початок відліку; τ_0 – час від початку календарного року, що відповідає максимуму подачі газу по газопроводу за даний період.

Зі співвідношення (1) безпосередньо слідує:

$$\frac{Q_{max}}{Q_m} = 1 + \beta; \quad \frac{Q_{min}}{Q_m} = 1 - \beta.$$

Якщо прийняти, що потужність яка витрачається на перекачку газу по станції, пропорційна кубу пропускної здатності газопроводу, то поточна відносна потужність буде визначатися співвідношенням:

$$\frac{N}{N_m} = \left(\frac{Q}{Q_m}\right)^3 = [1 + \beta \cdot \cos(\varphi - \varphi_0)]^3,$$

де N_m – гідравлічна потужність (потенціальна (технічна) робота в одиницю часу, що витрачається на переміщення газу з області одного тиску до області іншого.), необхідна для перекачування середньорічної кількості газу (Q_m) по даному газопроводу.

Відповідно, відносні найбільші і найменші гідравлічні потужності газопроводу складуть:

$$\frac{N_{max}}{N_m} = (1 + \beta)^3;$$

$$\frac{N_{min}}{N_m} = (1 - \beta)^3; \quad \frac{N_{max}}{N_{min}} = \left(\frac{1 + \beta}{1 - \beta}\right)^3;$$

$$\frac{N_m}{N_0} = \frac{1}{N_0} \int_0^\tau N d\tau = \frac{1}{2\pi} \int_0^{6\varphi} [1 + \beta \cdot \cos(\varphi - \varphi_0)]^3 d\varphi = 1 + 1.5\beta^2.$$

Наведені співвідношення дозволяють відносно легко визначати коливання гідравлічної потужності газопроводів, та визначати недозавантаженість компресорних станцій.

На підставі отриманих даних про нерівномірність транзиту проведені розрахунки

показників гідравлічної потужності досліджуваного газопроводу (табл. 2).

Таблиця 2 – Показники гідравлічної потужності досліджуваного газопроводу

Показник	2015	2016	2017	2018
$\frac{N_{max}}{N_m} = (1 + \beta)^3$	3.695	3.112	2.440	3.504
$\frac{N_{min}}{N_m} = (1 - \beta)^3$	0.094	0.157	0.279	0.111
$\frac{N_{max}}{N_{min}} = \left(\frac{1 + \beta}{1 - \beta}\right)^3$	39.5	19.8	8.7	31.5
$\frac{N_m}{N_0} = 1 + 1.5\beta^2$	1.447	1.317	1.180	1.404

Коливання максимальної та мінімальної гідравлічної потужності за період з 2015 по 2018 рік змінюється в межах 8.7-39.5, що свідчить про значні перепади в режимах роботи компресорних станцій та необхідність оптимізації їх роботи.

Одним із головних завдань управління технологічним режимом роботи КС є підтримка тиску на стороні нагнітання на заданому рівні при оптимальному розподілі навантаження між агрегатами. При цьому під оптимальним розподілом розуміється таке навантаження агрегатів, яка забезпечує мінімум енерговитрат на компримування заданого обсягу газу при відповідних граничних умовах на вході і виході КС.

З огляду на особливості математичного опису компресорних станцій і результати аналізу керуючих впливів, була сформульована наступна задача оптимізації режимів роботи компресорної станції: при заданому обсязі газу і фіксованих граничних умовах – тиску на вході $P_{вх}$ виході $P_{вих}$ і температури газу на вході $T_{вх}$ визначити таке поєднання машин, діаметр робочих коліс нагнітачів, обороти (в разі регульованого приводу) по ступенях, положення регулюючих уставок, щоб був забезпечений мінімум енергетичних витрат по КС [12]:

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

і виконувалися наступні технологічні обмеження

$$P_{вих} < P'_{вих}, \quad n_{1 min} \leq n_1 \leq n_{1 max}, \quad N_{ij} < N'_{ij},$$

$$T_{вих} < T'_{вих}, \quad \Delta q < \Delta q',$$

де \bar{u} – вектор управління, компонентами якого є параметри: число оборотів і агрегатів, уставки кранів; \bar{r} – вектор режимів, який визначається тиском, витратою і температурою; m – число паралельних груп агрегатів, n – число послідовних ступенів, N'_{ij} , $T'_{вих}$, $\Delta q'$, $P'_{вих}$ – максимальні значення потужності, температури, байпасованої кількості газу і тиску на виході відповідно, $n_{1 min}$, $n_{1 max}$ – мінімальні і максимальні допустимі обороти нагнітачів.

Відповідно до [9] пропускною здатністю магістрального газопроводу називається кількість

газу, яка може бути передана газопроводом за добу в умовах стаціонарного режиму перекачування, максимально можливого використанні наявної потужності газоперекачувальних агрегатів (далі ГПА) та прийнятих параметрах (робочий тиск, коефіцієнт гідравлічної ефективності, температура навколишнього повітря і ґрунту, температура охолодження газу і т.п.).

Рішення поставленого завдання може бути здійснене шляхом проведення послідовних наближень до досягнення необхідної наперед заданої точності розрахунків [13]. Для чого задавшись певним значенням пропускної здатності системи в першому наближенні, проводять розрахунки режимів роботи компресорної станції та лінійної частини газопроводу при заданих температурних умовах повітря та ґрунту, розглядаючи дані об'єкти як єдину узгоджену систему (тобто тиск і температура газу на виході КС повинна дорівнювати тиску і температурі газу на початку лінійної ділянки, витрата газу в трубопроводі повинна дорівнювати продуктивності КС з врахування витрат газу на власні потреби компресорної станції). Якщо при цьому тиск на вході в наступну компресорну станцію, визначений розрахунками, не відповідатиме поставленій точності заданого тиску (в даному випадку номінальному), то необхідно змінити значення пропускної здатності на певну величину і знову провести всі необхідні розрахунки. Таким чином розрахунки необхідно проводити змінюючи значення витрати газу з певним кроком до досягнення необхідної точності. В такому випадку доцільним є створення алгоритму визначення пропускної здатності системи, на основі якого може бути розроблене програмне забезпечення для проведення розрахунків з використанням обчислювальної техніки.

Вхідними даними розрахунку є:

- продуктивність газопроводу Q_z , млрд. м³/рік;
- довжина ділянки газопроводу $L_{тр}$, км;
- абсолютний тиск газу на вході в компресорну станцію $P_{вхКС}$, МПа;
- температура газу на вході у компресорну станцію $T_{вх}$, К;
- абсолютний тиск газу в кінці ділянки на вході в наступну компресорну станцію $P_{вихКС}$, МПа;
- склад природного газу в об'ємних частках;
- максимальне значення абсолютного тиску газу на виході ГПА $P_{доп}$, МПа;
- середня за розрахунковий період температура повітря T_a , К;
- геодезична позначка майданчика КС.

КС «Гарутине» оснащена трьома повнонапірними відцентровими нагнітачами ГПА-Ц-16С з одиничною продуктивністю 35,5 млн. м³/д обладнаним двигуном ДГ90Л2. Потужність приводу становить 16 МВт. Номінальний тиск газу на виході 7,5 МПа. Паспортний ККД становить 34%, а фактичний знаходиться в діапазоні 31.76-33.96%.

Оскільки алгоритм визначення пропускної здатності та енерговитратності газопроводу для заданої ГПА передбачає циклічні багатоваріантні

розрахунки та необхідність використання функцій інтерполяції, методів оптимізації та ін., було прийнято рішення про розробку програмного забезпечення у мові програмування MATLAB [14]. Ця мова програмування орієнтована на технічні і математичні розрахунки і здатна перевершити можливості традиційних мов програмування, котрі багато років використовувались для реалізації чисельних методів.

Особливості реалізації алгоритмі наступні:

1. Математичні моделі нагнітачів реалізовані у вигляді функцій в залежності від вхідного параметра $Q_{зв}$. Для кожної з функцій реалізований вбудований в систему MATLAB метод інтерполяції. Наприклад, функція для визначення політропічного ККД має наступний формат:

```
function y = f_eta_pol(Q_zv)
y = interp1([252 408 492], [0.72 0.84 0.775], Q_zv,
'pchip');
end
```

Функція `interp1` реалізує декілька методів побудови сплайну. Лінійна сплайн-інтерполяція, інтерполяція кубічним поліномом, інтерполяція кубічним сплайном та «Pchip» - інтерполяція кубічним ермітовим сплайном, що вибрана в даній моделі розрахунку.

Матриці з числами [252 408 492] та [0.72 0.84 0.775] – координати трьох точок з паспортних характеристик нагнітача.

2. Пошук оптимального значення режимів роботи КЦ здійснюється наступним чином:

- задається продуктивність газопроводу, або річна у млрд. м³/рік, або добова у млн. м³/добу;
- задається коефіцієнт завантаження кожного ГПА в межах 1-0,5 при роботі двох нагнітачів та одиниці у випадку використання одного ГПА;
- організовується цикл зміни частоти нагнітачів(а) при умові дотримання технологічних обмежень;
- проводиться розрахунок за наведеним вище алгоритмом;
- для кожної частоти та коефіцієнту завантаження фіксуються отримана сумарна потужність ГПА та умови при яких вона отримана;
- для кожної певної заданої продуктивності визначається мінімальні витрати потужності.

Отримані результати оптимальних режимів експлуатації записуються у файл Excel для подальшої обробки та побудови графічних залежностей.

Висновки

На основі розробленого програмного забезпечення у мові програмування MATLAB було виконано багатоваріантні розрахунки визначення пропускної здатності та енерговитратності газопроводу для різних комбінацій працюючих ГПА та встановлено, що, наприклад, за добової продуктивності 60 млн. м³ мінімальні витрати потужності склали 27945 кВт при двох працюючих

ГПА з частотами обертання нагнітачів $n_1 = 5165$ об/хв, $n_2 = 4792$ об/хв.

Також була проведена оптимізація режимів експлуатації ділянки Тарутине–Орлівка за критерієм мінімальних витрат потужності та визначені оптимальні режими експлуатації.

Список літератури

1. **Eser, P.** Impact of Nord Stream 2 and LNG on gas trade and security of supply in the European gas network of 2030 / **P. Eser, N. Chokani, R. Abhari** // *Applied energy*. – 2019. № 238. – P. 816-830.
2. МШУ «Сколково»: один год до часа «Ч»: в поисках компромисса по украинскому газовому транзиту. Декабрь 2018 // *Национальная Ассоциация нефтегазового сервиса*. – URL: <https://nangs.org/analytics/mshu-skolkovo-odin-god-do-chasa-ch-v-poiskakh-kompromiss-po-ukrainskomu-gazovomu-tranzitu-dekabr-2018-pdf>.
3. **Wolczuk, K.** Managing the flows of gas and rules: Ukraine between the EU and Russia / **K. Wolczuk** // *Eurasian Geography and Economics*. – 2016. – №57:1. – P. 113-137. – doi: 10.1080/15387216.2016.1174072.
4. Група Нафтогаз. Річний звіт. 2019. – URL: <http://www.naftogaz.com/files/Zvity/Annual-Report-2018-ukr.pdf> (дата звернення: 20.10.2019).
5. **Yafimava, K.** The Transit Dimension of EU Energy Security: Russian Gas Transit Across Ukraine, Belarus, and Moldova / **K. Yafimava** // *OUP Catalogue, Oxford University Press*. – 2011. N. 9780199599226. – URL: <https://ideas.repec.org/b/oxp/obooks/9780199599226.html>.
6. **Pirani, S.** Russian Natural Gas Exports to Europe / **S. Pirani** // *Russian Analytical Digest*. – 2018. – 221.
7. **Михалків, В. Б.** Дослідження режимів роботи складної системи газопроводів у разі її недовантаження / **В. Б. Михалків** // *Нафтогазова галузь України*. – 2015. – № 6. – С. 26–29.
8. **Titlov, O.** Evaluation of the prospects for preliminary cooling of natural gas on main pipelines before compression through the discharge of exhaust heat of gas-turbine units / **O. Titlov, O. Vasylyv, T. Sahala, N. Bilenko** // *EUREKA: Physics and Engineering*. – 2019. – P. 47-55. – doi:10.21303/2461-4262.2019.00978.
9. Общесоюзные нормы технологического проектирования. Магистральные трубопроводы. Ч.1. Газопроводы: ОНТП 51-1-85. – [Введены 1986-01-01]. – М.: Мингазпром. – 221 с.
10. **Sturges, H. A.** The Choice of a Class Interval / **H. A. Sturges** // *Journal of the American Statistical Association*, 1926. – vol. 21. – no. 153, – P. 65-66.
11. **Козаченко, А. Н.** Энергетика трубопроводного транспорта газов / **А. Н. Козаченко, В. И. Никишин, Б. П. Поршаков**. – М.: Нефть и газ, 2001. – 398 с.
12. **Гладун, С. В.** Моделивання та розрахунок оптимальних параметрів роботи підземного сховища газу в системі магістральних трубопроводів : дис... на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук : 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи / **С. В. Гладун**; Національна академія наук України, Центр математичного моделювання Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача. – Львів, 2017. – 157 с.
13. **Середюк, М. Д.** Вибір енергоефективних режимів експлуатації магістральних газопроводів за їх неповного завантаження / **М. Д. Середюк, М. Є. Ганжа** //

Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2017. – № 1. – С. 67-72.

14. **Nagar, S.** Introduction to MATLAB: For Engineers and Scientists / **Nagar, S.** – Berkeley, 2017. – 213 p. – doi: 10.1007/978-1-4842-3189-0.

References (transliterated)

1. **Eser, P., Chokani, N., & Abhari, R.** Impact of Nord Stream 2 and LNG on gas trade and security of supply in the European gas network of 2030. *Applied energy*, 2019, **238**, 816-830.
2. MShU "Skolkovo": odin god do chasa «Ch»: v poiskakh kompromiss-a po ukrainskomu gazovomu tranzitu [LNA "Skolkovo": one year before the hour "Ch": in search of a compromise on Ukrainian gas transit]. Dekabr 2018 // *Nacionalnaya Associaciya neftegazovogo servisa [National Association of Oil and Gas Services]*. Available at: <https://nangs.org/analytics/mshu-skolkovo-odin-god-do-chasa-ch-v-poiskakh-kompromiss-po-ukrainskomu-gazovomu-tranzitu-dekabr-2018-pdf>.
3. **Wolczuk, K.** Managing the flows of gas and rules: Ukraine between the EU and Russia. *Eurasian Geography and Economics*, 2016, **57:1**, 113-137, doi: 10.1080/15387216.2016.1174072.
4. Hrupa Naftohaz. Richnyi zvit 2019 [Naftogaz Group. Annual Report: 2019]. Available at: <http://www.naftogaz.com/files/Zvity/Annual-Report-2018-ukr.pdf> (date of the application 20.10.2019).
5. **Yafimava, K.** The Transit Dimension of EU Energy Security: Russian Gas Transit Across Ukraine, Belarus, and Moldova. *OUP Catalogue, Oxford University Press*, 2011, 9780199599226. Available at: <https://ideas.repec.org/b/oxp/obooks/9780199599226.html>.
6. **Pirani, S.** Russian Natural Gas Exports to Europe. *Russian Analytical Digest*, 2018, 221.
7. **Mikhalkov, V. B.** Doslidzhennia rezhymiv roboty skladnoi systemy hazoprovodiv u razi yii nedovantazhennia [Investigation of modes of operation of a complex system of gas pipelines in case of its underloading]. *Naftohazova haluz Ukrainy [Oil and gas industry of Ukraine]*, 2015, **6**, 26-29.
8. **Titlov, O., Vasylyv, O., Sahala, T., Bilenko, N.** Evaluation of the prospects for preliminary cooling of natural gas on main pipelines before compression through the discharge of exhaust heat of gas-turbine units. *EUREKA: Physics And Engineering*, 2019, 47-55, doi:10.21303/2461-4262.2019.00978.
9. Obshesoyuznye normy tehnologicheskogo proektirovaniya. Magistralnye truboprovody. Ch. 1. Gazoprovody: ONTP 51-1-85 [All-Union norms of technological design. Trunk pipelines. Part 1. Gas pipelines: ONTP 51-1-85]. [Introduced 1986-01-01]. М.: Mingazprom, 221.
10. **Sturges, H.** The Choice of a Class Interval. *Journal of the American Statistical Association*, 1926, **21** (153), 65-66.
11. **Kozachenko, A. N., Nikishin, V. I., Porshakov, B. P.** Energetika truboprovodnogo transporta gazov [Energy pipeline transport of gases]. М.: Neft i gaz [Oil and gas], 2001, 398.
12. **Hladun, S. V.** Modeliuvannia ta rozrakhunok optymalnykh parametriv roboty pidzemnogo skhovyshcha hazu v systemi mahistralnykh truboprovodiv [Model and rozrakhunok optimal parameters robots pidzemnogo monsters gas in the system magistralnyh pipelines]: dys. na zdobuttia naukovoho stupenia kand. tekhn. nauk : 01.05.02 Natsionalna akademiia nauk Ukrainy, Tsentri matematychnoho modeliuvannia Instytutu prykladnykh

- problem mekhaniky i matematyky im. Ya. S. Pidstryhacha [National Academy of Sciences of Ukraine, Center for Mathematical Modeling Institute of Applied Problems of Mechanics and Mathematics named after Ya. S. Pidstrigach]. – Lviv, 2017, 157.
13. **Serediuk, M. D., Hanzha, M. Ye.** Vybir enerhoefektyvnykh rezhymiv ekspluatatsii mahistralnykh hazoprovodiv za yikh nepovnoho zavantazhennia [The choice of energy efficient modes of operation of the main gas pipelines with their incomplete loading]. *Naukovyi visnyk Ivano-Frankivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu nafty i hazu [Scientific Bulletin of the Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas.]*. 2017, **1**, 67-72.
14. **Nagar, S.** Introduction to MATLAB: For Engineers and Scientists. Berkeley, CA: Apress, 2017, 213, doi: 10.1007/978-1-4842-3189-0.

Відомості про авторів (About authors)

Василів Олег Богданович – кандидат технічних наук, доцент, Одеська національна академія харчових технологій, доцент кафедри теплоенергетики та трубопровідного транспорту енергоносіїв, м. Одеса, Україна, ORCID: 0000-0002-0597-8863, e-mail: oleg_vas@ukr.net.

Oleg Vasylyv – Candidate of Technical Sciences, Docent, Odesa National Academy of Food Technologies, Department of Heat-and-Power Engineering and Fuel Pipeline Transport, Odesa, Ukraine, ORCID: 0000-0002-0597-8863, e-mail: oleg_vas@ukr.net.

Тітлов Олександр Сергійович – доктор технічних наук, професор, Одеська національна академія харчових технологій, завідувач кафедри теплоенергетики та трубопровідного транспорту енергоносіїв, м. Одеса, Україна, ORCID: 0000-0003-1908-5713, e-mail: titlov1959@gmail.com.

Aleksandr Titlov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Odesa National Academy of Food Technologies, Head of Department of Heat-and-Power Engineering and Fuel Pipeline Transport, Odesa, Ukraine, ORCID: 0000-0003-1908-5713, e-mail: titlov1959@gmail.com.

Ліпін Андрій Павлович – кандидат технічних наук, доцент, Одеська національна академія харчових технологій, доцент кафедри технологічного обладнання зернових виробництв, м. Одеса, Україна, ORCID: 0000-0002-2817-9589, e-mail: armavir62@ukr.net.

Andrii Lipin – Candidate of Technical Sciences, Docent, Odesa National Academy of Food Technologies, Department of technological equipment of grain production, Odesa, Ukraine, ORCID: 0000-0002-2817-9589, e-mail: armavir62@ukr.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Василів, О. Б. Дослідження режимів роботи газопроводів на ділянці Тарутине – Орлівка / **О. Б. Василів, О. С. Тітлов, А. П. Ліпін** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 2. – С. 3-9. – doi:10.20998/2413-4295.2019.02.01.

Please cite this article as:

Vasylyv, O., Titlov, A., Lipin, A. Investigation of gas pipeline operating regimes at Tarutyne – Orlivka section. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, **2**, 3-9, doi:10.20998/2413-4295.2019.02.01.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Васильев, О. Б. Исследование режимов работы газопроводов на участке Тарутино – Орловка / **О. Б. Васильев, А. С. Титлов, А. П. Липин** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 2. – С. 3-9. – doi:10.20998/2413-4295.2019.02.01.

АННОТАЦІЯ В роботі представлено огляд стану транзиту природного газу по території України через газотранспортну систему і розглянуті перспективи подальшої завантаженості, враховуючи побудовані альтернативні обхідні газопроводи. В якості об'єкта дослідження вибрано відповідне ГТС України в південному напрямку, яке проходить через газоизмерительную станцію «Орловка», де здійснюється вимірювання кількості та визначення якості передаваного природного газу. На основі аналізу даних про нерівномірність транзиту в зазначеному напрямку проведено їх групування за кількісним ознакою і визначено необхідне число інтервалів. Розраховано відносну амплітуду коливань подачі газу і проведено розрахунки показників гідравлічної потужності газопроводів. Встановлено, що коливання максимальної і мінімальної гідравлічної потужності за період з 2010 по 2018 гг. змінювалися в межах 8.7-39.5, що свідчить про значні перепади в режимах роботи компресорних станцій і необхідність оптимізації їх роботи. На основі огляду літературних джерел розроблено методика визначення пропускної спроможності та енергозатратності газопроводу для заданої комбінації працюючих газоперекачуючих агрегатів (ГПА). Розрахунки проводилися для газопроводу Ананьєв–Тирасполь–Ізмаїл на ділянці Тарутино–Орловка. Методика містить розрахунок фізичних властивостей газу за його складом, розрахунок компримованості газу, розрахунок лінійної частини, витрати газу на власні потреби компресорної станції і розрахунок сумарної потужності газоперекачуючих агрегатів при заданих технологічних обмеженнях. С допомогою розробленого оригінального програмного забезпечення на мові програмування MATLAB виконано циклічні багатоваріантні розрахунки пропускної спроможності та енергозатратності газопроводу і проведено оптимізацію режимів роботи компресорного цеху. В якості критерію оптимізації вибрана мінімальна сумарна потужність ГПА. Змінними параметрами при цьому виступають частоти обертання нагнетателів, різні комбінації працюючих ГПА, коефіцієнт завантаженості.

Ключові слова: газотранспортна система; недогрузка; гідравлічна потужність; енергозатратність; оптимізація

Поступила (received) 28.09.2019