

УДК 621.643

Маляренко В.А., д.техн.н., професор, Ільченко М.Б., аспірант

*Харківський національний університет міського господарства ім.О.М. Бекетова*

**МЕТОД ОЦІНКИ РЕЗЕРВУ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ  
НА ВИРОБНИЧО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ПОТРЕБИ  
ГАЗОТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ**

**Ключові слова:** енерговитрати, оптимізація, паливний газ, математична модель, компресорний цех.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Транспортування природного газу пов'язане зі значними витратами енергоресурсів на виробничо-технологічні потреби. Значну їх частину складають витрати паливного газу, що споживають газоперекачувальні агрегати (ГПА). Одним з ефективних напрямків економії паливного газу є оптимізація режимів роботи газотранспортної системи (ГТС) [1,2].

У даний час розроблено низку методів структурної і параметричної оптимізації роботи ГТС, що дозволяють визначати навантаження між компресорними цехами (КЦ) і ГПА, що працюють на компресорних станціях (КС). Ці методи розроблено виходячи з мінімуму споживання паливно-енергетичних ресурсів, у тому числі паливного газу і електроенергії (для ГПА з електроприводом) [3].

Завдання оптимізації режиму роботи магістрального газопроводу розглядається, як завдання послідовної оптимізації роботи двох сусідніх КС (КС1 і КС2) при заданих граничних умовах на кінцях газопроводу [4–6].

При заданих тисках газу на вході КС1 і виході КС2, заданої продуктивності, відомих параметрах газопроводу і характеристиках обладнання обох КС потрібно вирішити задачу оптимального розподілення навантаження між КС виходячи з мінімізації сумарних витрат паливного газу за умови відсутності відбору або подачі природного газу в газопровід між КС1 і КС2.

Сформульована задача оптимізації вирішується в два етапи. На першому етапі вирішується завдання перевірки базового режиму підтримання максимального тиску на виході кожної з КС. На другому етапі вирішується завдання пошуку оптимального режиму у разі, якщо базовий режим не є оптимальним. Як точка відліку приймається базовий режим з максимально припустимим тиском на виході КС1 –  $P_{вих}^1$ . Зміна витрат паливного газу визначається при зниженні цього тиску. Очевидно, що у разі збільшення сумарних витрат паливного газу для обох КС при відхиленні від базового режиму, оптимальним є базовий режим. У іншому випадку базовий режим не є оптимальним і витрати паливного газу можливо знижені за рахунок зміни навантаження агрегатів.

Критерієм оптимізації є функціонал сумарних витрат паливного газу  $G(P_{вих}^1)$  в функції від тиску газу на виході першої КС –  $P_{вих}^1$ :

$$G(P_{вих}^1) = G_{КС1}(\varepsilon_1, Q_{КОМ}^{КС}) + G_{КС2}(\varepsilon_2, Q_{КОМ}^{КС}), \quad (1)$$

де  $G_{КС1}$  – сумарні витрати паливного газу КС1;  $G_{КС2}$  – сумарні витрати паливного газу КС2;  $\varepsilon_1$  – ступінь стиснення на КС1;  $\varepsilon_2$  – ступінь стиснення на КС2.

Розв'язання задачі передбачає виконання таких дій:

- 1) обирається максимально можливе  $P_{вих}^1 = P_{вих \max}^1$  в якості початкового значення тиску газу на виході КС1;
- 2) вирішується завдання розподілу навантаження між ГПА КС1 з урахуванням їх фактичного технічного стану для заданих значень  $P_{вх}^1$ ,  $P_{вих}^1$ ,  $Q_{ком}^{КС}$ ;
- 3) обчислюється значення тиску газу на вході КС2 виходячи із залежності зміни тиску газу на лінійній ділянці:

$$\left(P_{вих}^1\right)^2 - \left(P_{вх}^2\right)^2 = f(\rho, \lambda, D, L, H) \cdot Q_{ком}^{КС}; \quad (2)$$

- 4) вирішується завдання розподілу навантаження між ГПА КС2 для отриманого значення  $P_{вх}^2$  і заданих  $P_{вих}^2$ ,  $Q_{ком}^{КС}$ ;

5) обчислюються сумарні витрати паливного газу  $G(P_{вих}^1)$  КС1 і КС2.

Потім обчислюється значення  $P_{вих}^1$  виходячи з мінімуму функціоналу (1).

При цьому частоти обертання обраних агрегатів приймають однаковими тому, що зазвичай в КЦ встановлюють ГПА одного типу, які мають однакові характеристики.

**Постановка проблеми.** При значних термінах експлуатації ГПА, близьких до відпрацювання встановленого ресурсу, експлуатаційні характеристики агрегатів можуть суттєво відрізнитись [7]. Це означає, що одні й ті ж самі параметри (продуктивність, вихідний тиск компримованого газу) для різних агрегатів досягаються при різних витратах паливного газу. У такому разі й при паралельно з'єднаних агрегатах в КЦ навантаження між ними може бути розподілене таким чином, щоб сумарні витрати паливного газу були мінімальні. Для цього у даній статті розглянуто вирішення двох взаємопов'язаних задач:

- оптимальний розподіл навантажень в КЦ між ГПА, що мають різний технічний стан, який характеризується різними витратно-напірними, потужностними, ККД характеристиками, коефіцієнтами технічного стану за паливним газом і потужністю;
- побудування залежності можливої економії паливного газу від показників відмін в технічному стані ГПА.

**Виклад основного матеріалу.** До основи математичної моделі КЦ під час вирішення задач оптимізації закладені індивідуальні фактичні характеристики відцентрових нагнітачів (ВЦН) і газотурбінних установок (ГТУ) [7], а також рівняння, що описують спільну роботу ВЦН ГПА в КЦ. У разі паралельного з'єднання вони мають вигляд:

$$\begin{aligned} \varepsilon^{КЦ} &= \varepsilon_k, \quad P_{вх}^{КЦ} = P_{вх k}, \quad P_{вих}^{КЦ} = P_{вих k}, \quad T_{вх}^{КЦ} = T_{вх k}, \\ \rho^{КЦ} &= \rho_k, \quad k = \overline{1, NK}, \quad Q_{ком}^{КЦ} = \sum_{k=1}^{NK} Q_{ком k}, \end{aligned} \quad (3)$$

де  $Q_{ком k}$  – комерційна продуктивність  $k$ -го ВЦН.

Критерій оптимальності  $F(n_1, \dots, n_{NK})$ :

$$F(n_1, \dots, n_{NK}) = \sum_{k=1}^{NK} G_{\text{ТГ}} \left( Y_k, N \left( Q_{\text{КОМ}k}, X_k, n_k \right) \right) \rightarrow \min, \quad (4)$$

де  $X_k$  – коефіцієнт технічного стану  $k$ -го ВЦН за потужністю;  $Y_k$  – коефіцієнт технічного стану  $k$ -го ГТУ за паливним газом;  $N \left( Q_{\text{КОМ}k}, X_k, n_k \right)$  – потужність  $k$ -го ВЦН, що визначається за фактичною характеристикою технічного стану нагнітача, МВт;  $G_{\text{ТГ}} \left( Y_k, N \left( Q_{\text{КОМ}k}, X_k, n_k \right) \right)$  – витрати паливного газу  $k$ -го ГТУ, що розраховані за фактичною характеристикою установки, кг/ч.

При оптимізації функціоналу (4) повинна виконуватися система обмежень:

- за максимально припустимим значенням тиску газу на виході ВЦН;
- за максимальним і мінімальним значеннями зведеної об'ємної продуктивності і частотам обертання ротора ВЦН;
- за максимально припустимим ступенем стиснення.

Ця задача вирішується через визначення мінімуму цільової функції методом по-координатного спуску [8,9].

Якщо працюючі в цеху агрегати мають однаковий функціонально-технічний стан (ФТС), то оптимальний режим роботи КЦ забезпечується при однакових частотах обертання роторів ВЦН. У разі істотної відміни ФТС ВЦН і ГТУ різних ГПА оптимальне розподілення навантаження між агрегатами КЦ також істотно відрізняється. Існує залежність між ступенем відмінності ФТС ВЦН і ГТУ у КЦ і ефективністю оптимального режиму роботи КЦ.

Для її визначення проведений числовий експеримент, який складається з наступних розрахунків.

Ефективність оптимального режиму роботи КС розраховується для послідовно змінюючихся коефіцієнтів технічного стану ВЦН і ГТУ кожного з агрегатів у різних комбінаціях. Для кожного набору оцінок ФТС ВЦН і ГТУ, включаючи їх фактичні характеристики, проведена серія розрахунків оптимального і рівномірного режимів навантаження ГПА для різних параметрів режиму роботи КЦ. Відносна економія паливного газу обчислювалася як середнє значення різниці показників оптимальності:

$$\Delta(\bar{X}, \bar{Y}) = \frac{\sum_{i=1}^{NI} \left( \frac{G_{\text{ТГ}}^{\text{равн}}(P_i) - G_{\text{ТГ}}^{\text{опт}}(P_i)}{G_{\text{ТГ}}^{\text{равн}}(P_i)} \right)}{NI}, \quad (5)$$

де  $\Delta(\bar{X}, \bar{Y})$  – функціонал відносної економії витрат паливного газу ГПА КЦ;  $\bar{X}, \bar{Y}$  – вектори КТС ВЦН і ГТУ ГПА в КЦ;  $P_i$  –  $i$ -й вектор вимірюваних параметрів ГПА ( $i = \overline{1, NI}$ );  $NI$  – кількість вимірювань;  $G_{\text{ТГ}}^{\text{равн}}(P_i)$  – сумарні витрати паливного газу при рівномірному навантаженні ГПА;  $G_{\text{ТГ}}^{\text{опт}}(X_i)$  – сумарні витрати паливного газу при оптимальному навантаженні ГПА.

Використовуючи результати вище наведеного числового експерименту, в роботі отримані рівняння множинної лінійної регресії [10], що пов'язують величину обсягу економії паливного газу в КЦ з коефіцієнтами технічного стану ВЦН і ГТУ ГПА, ступенем стиснення, комерційною продуктивністю для агрегатів потужністю 6,0 і 10,0 МВт у вигляді:

$$\Delta = \alpha_1 X_{cp} + \alpha_2 Y_{cp} + \alpha_3 Q_{ком\ КЦ} + \alpha_4 \varepsilon_{КЦ}, \text{ кг/год}, \quad (6)$$

де  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  – коефіцієнти регресії;  $X_{cp}, Y_{cp}$  визначають за формулами:

$$X_{cp} = \frac{1}{NK} \cdot \sum_{k=1}^{NK} \left| X_k - \frac{\sum_{k=1}^{NK} X_k}{NK} \right|; \quad (7)$$

$$Y_{cp} = \frac{1}{NK} \cdot \sum_{k=1}^{NK} \left| Y_k - \frac{\sum_{k=1}^{NK} Y_k}{NK} \right|.$$

Ці залежності на практиці дозволяють оцінити резерв енергозбереження і визначити доцільність оптимізації навантаження між ГПА.

У якості прикладу для п'ятих паралельно з'єднаних ГПА потужністю 10,0 МВт були розраховані значення витрат паливного газу при рівномірному розподіленні навантажень і оптимальному згідно(4) при обмеженнях (3). При цьому коефіцієнти технічного стану ВЦН за потужністю змінювались в обмеженнях  $0,8 \leq X < 1,0$ , коефіцієнти технічного стану ГТУ за паливним газом змінювались в обмеженнях  $0,65 \leq Y < 1,0$ . Розрахунок робочих параметрів ГПА для кожного з варіантів виконувався за допомогою програмного комплексу «Діагностика ГПА» [7].

У розглянутому прикладі максимальна економія складає 125 кг/год паливного газу або  $\sim 0,9\%$ , а середня за номінальних параметрів компримуємого газу  $0,65\%$ .

Цей результат доводить, що оптимізація навантажень ГПА в КЦ представляє значний резерв економії газу на виробничо-технологічні потреби.

### **Висновки**

1. Розроблена постановка і вирішення задачі оптимального розподілення навантажень в компресорному цеху між ГПА з різним технічним станом за критерієм мінімуму витрат паливного газу з урахуванням режимних та технологічних обмежень.
2. Проведений числовий експеримент за результатом якого визначені навантаження ГПА, що відповідають мінімуму витрат паливного газу в широкому діапазоні зміни коефіцієнтів технічного стану ГПА, ступенів стиснення і продуктивності КЦ.
3. Отримані залежності економії паливного газу під час роботи КЦ в оптимальному режимі від коефіцієнтів технічного стану і параметрів режиму роботи ГПА.

### **Література**

1. Говдяк Р.М. Підвищення енергоефективності газотранспортної системи // Трубопровідний транспорт. – 2011. – №5 – С. 27–35.
2. Поршаков Б.П., Калинин А.Ф., Купцов С.М. Энергосберегающие технологии при магистральном транспорте газа / Б.П. Поршаков, А.Ф. Калинин, С.М. Купцов//М. – МПА – Пресс. – 2006. – 311 с.

3. Будзуляк Б.В., Пашин С.Т., Китаев С.В. Повышение эффективности режимов работы компрессорных станций//Газовая промышленность. – 2005. – №1. – С. 17–29.
4. Вангин А.Г. Оптимизация совместной параллельной работы газоперекачивающих агрегатов//Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – №1. – 2013. – С. 31–37.
5. Калинин А.Ф. Расчет, регулирование и оптимизация режимов работы газоперекачивающих агрегатов /А.Ф. Калинин //М. – МПА – Пресс. – 2011. – 264 с.
6. Иванов Э.С. Совершенствование процессов эксплуатации газоперекачивающих агрегатов/Э.С. Иванов, А.И. Гольянов // Территория нефтегаз. – №4. – 2012. – С. 64–71.
7. Ильченко Б.С. Діагностування функціонально-технічного стану газоперекачувальних агрегатів /Б.С. Ильченко //Х. – ХНАМГ. – 2011. – 228 с.
8. Маляренко В.А., Ильченко М.Б. Снижение энергозатрат при эксплуатации газотранспортных систем путем автоматизации их учета /В.А. Маляренко, М.Б. Ильченко // Комунальне господарство міст. – 2017. – №134. – С. 27–34.
9. Деннис Дж. Численные методы оптимизации и решение нелинейных уравнений / Дж. Деннис // М. – Мир – 1988. – 474 с.
10. Афифи А., Эйзен С. Статистический анализ/ А. Афифи, С. Эйзен // М. – Мир – 1982. – 488 с.

Bibliography (transliterated)

1. Govdyak R.M. Pidvischennya energoefektivnosti gazotransportnoyi sistemi // Truboprovodniy transport. – 2011. – #5 – P. 27–35.
2. Porshakov B.P., Kalinin A.F., Kuptsov S.M. Energoberegayushchie tehnologi pri magistralnom transporte gaza / B.P. Porshakov, A.F. Kalinin, S.M. Kuptsov//М. – МПА – Пресс. – 2006. – 311 p.
3. Budzulyak B.V., Pashin S.T., Kitaev S.V. Povyishenie effektivnosti rezhimov raboty kompressornyih stantsiy // Gazovaya promyshlennost. – 2005. – #1. – P. 17–29.
4. Vangin A.G. Optimizatsiya sovместnoy parallelnoy raboty gazoperekachivayushchih agregatov // Elektronnyiy nauchnyiy zhurnal «Neftegazovoe delo». – #1. – 2013. – P. 31–37.
5. Kalinin A.F. Raschet, regulirovanie i optimizatsiya rezhimov raboty gazoperekachivayushchih agregatov /A.F. Kalinin //М. – МПА – Пресс. – 2011. – 264 p.
6. Ivanov E.S. Sovershenstvovanie protsessov ekspluatatsii gazoperekachivayushchih agregatov / E.S. Ivanov, A.I. Golyanov // Territoriya neftegaz. – #4. – 2012. – P. 64–71.
7. Ilchenko B.S. Diagnostuvannya funktsionalno-tehnichnogo stanu gazoperekachivalnih agregativ / B.S. Ilchenko // H. – HNAMEG. – 2011. – 228 p.
8. Malyarenko V.A., Ilchenko M.B. Snizhenie energozatrat pri ekspluatatsii gazotransportnyih sistem putem avtomatizatsii ih ucheta / V.A. Malyarenko, M.B. Ilchenko // Komunalne gospodarstvo mist. – 2017. – #134. – P. 27–34.
9. Dennis Dzh. Chislennyye metody optimizatsii i reshenie nelineynyih uravneniy / Dzh. Dennis // М. – Мир – 1988. – 474 p.
10. Afifi A., Eyzhen S. Statisticheskiy analiz / A. Afifi, S. Eyzhen // М. – Мир – 1982. – 488 p.

УДК 621.643

Маляренко В.А., д.техн.н., профессор, Ильченко М.Б., аспирант

*Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А.Н. Бекетова*

**МЕТОД ОЦЕНКИ РЕЗЕРВА СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОЗАТРАТ  
НА ПРОИЗВОДСТВЕННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ НУЖДЫ  
ГАЗОТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ**

Приведен анализ методов снижения расхода природного газа на производственно-технологические нужды за счет оптимизации режимов работы газопроводов. Описана постановка и решение задачи распределения нагрузок между параллельно соединенными газоперекачивающими агрегатами компрессорного цеха, имеющими различное техническое состояние.

Проведен численный эксперимент, в результате которого определена экономия топливного газа за счет выбора оптимального режима при различных сочетаниях коэффициентов технического состояния газоперекачивающих агрегатов для различных степеней сжатия и производительностей компрессорного цеха.

На основании полученных экспериментальных данных получены регрессионные зависимости экономии топливного газа за счет оптимизации режимных параметров газоперекачивающих агрегатов. Рассчитана возможная экономия топливно-энергетических ресурсов за счет предложенного метода для парка ГПА мощностью 6.0–10.0 МВт

Malyarenko V., Ilchenko M.

**METHOD EVALUATING OF THE RESERVE FOR THE REDUCTION OF  
ENERGY COSTS ON THE PRODUCTION AND TECHNOLOGICAL NEEDS OF  
THE GAS TRANSPORTATION SYSTEM**

The analysis of methods for reducing the consumption of natural gas for industrial and technological needs is provided by optimizing the operation of gas pipelines. The formulation and solution of the problem of distribution of loads between parallel connected gas compressor units of the compressor shop having different technical state.

A numerical experiment has been performed, as a result of which the fuel gas economy has been determined due to the choice of the optimal mode for various combinations of the technical state of the gas compressor units for various compression ratios and the compressor shop productivity.

On the basis of the experimental data obtained, regression dependences of the fuel gas economy are obtained due to optimization of the operating parameters of the gas pumping units. The possible saving of fuel and energy resources is calculated at the expense of the proposed method for the gas compressor units park with a capacity of 6.0–10.0 MW