

УДК 622.692.4

**ПРИНЦИПИ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГАЗОПРОВОДУ****Я. В. Грудз**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;  
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;  
тел. +380 (342) 4-21-57; e-mail: public@iung.edu.ua*

*Приведено принципи оптимізації режимів роботи магістральних газопроводів і складних газотранспортних систем з використанням різноманітних критеріїв оптимальності. Запропоновано методику оптимізації режимів роботи ГТС в умовах переходу до ринкових відносин.*

**Ключові слова:** *множина режимів, критерії оптимальності, оптимізація*

Оптимальним режимом роботи газопроводу вважають режим, параметри якого забезпечують екстремальне значення деякого критерію оптимальності.

Нова реальність вимагає знаходити нові нетрадиційні рішення щодо максимізації прибутку за рахунок ефективного і повного використання виробничих ресурсів систем трубопровідного транспорту газу. Оперативне одержання відповідної інформації про ситуацію; автоматизована обробка, систематизація та аналіз інформації, яка використовується для підготовки рішень, має бути матеріалізована у вигляді системи розрахункових моделей, яка спроможна визначити економічно доцільні варіанти функціонування та адаптаційного розвитку виробничих структур, а також спрогнозувати ефективність (чи неефективність) вживаних на часі стратегічних орієнтирів щодо покращення економічного стану газотранспортної галузі.

Формування ринкових відносин в сфері трубопровідного транспорту газу пов'язане з необхідністю використання ринкових законів, на основі яких належить віднайти спонукальні мотиви для трансформаційних реформ, що мають забезпечити максимальну прибутковість газотранспортного виробництва. Ринкова переорієнтація газотранспортної галузі - найважливіша методологічна установка підвищення її економічної ефективності. Це прямо й безпосередньо виводить на економічний блок проблем.

Дослідження конкретизовані відповідно до стану газотранспортної галузі в короткостроковому Врахування "неекономічних факторів" зовнішнього середовища на сьогодні практично неможливе: правильна сама по собі ідея максимально розширити і поглибити розрахунковий аналіз наштовхується на невизначеність відокремлених аспектів проблеми та відсутність модельного і інформаційного її забезпечення.

До критеріїв оптимальності режимів відносять мінімум собівартості перекачування, максимум об'єму перекачування, мінімум сумарної потужності компресорних станцій, максимум показників надійності системи і т. д. На практиці для проведення оптимізації режимів користуються відразу декількома критеріями оптимальності. Кожному з них присвоюється певний ранг (пріоритет перед іншими) і певний ваговий коефіцієнт. Одержана таким чином функція носить назву функції мети. Параметри оптимального режиму повинні забезпечувати екстремум функції мети.

Процедура оптимізації режимів полягає в тому, що критерії оптимальності режиму виражаються через його параметри (тиски, температури, витрати газу) за допомогою відомих рівнянь стаціонарної течії газу в газопроводі. Далше глобальний екстремум функції мети може бути знайдено, якщо часткові похідні по параметрах режиму прирівняти до нуля. Проте ряд залежностей, які пов'язують параметри режиму з певними критеріями оптимальності, мають емпіричний характер, в зв'язку з чим ряд часткових похідних може не існувати. Крім того, часто функція мети може взагалі не мати глобального екстремуму. Тому вказаний напрямок не знайшов визнання в галузі оптимізації режимів роботи газопроводів.

Найбільш поширеними вважаються два методи оптимізації режимів: метод перебору варіантів і метод штрафних функцій. Перший полягає в тому, що для всіх режимів з області допустимих, знаходяться значення функцій мети. Оптимальним режимом вважають такий, для якого числове значення функцій мети найбільше (або найменше). Другий метод полягає в тому, що параметри деякого режиму з області допустимих змінюють на деякий дискретний крок і шукають значення функції мети для обох режимів. Якщо функція мети для нового режиму змінилась в сторону покращення, то продовжують пошук в тому ж напрямку. Якщо функція мети для нового режиму змінилась в сторону погіршення, то їй приписується певний штраф і пошук продовжується в іншому напрямку. Недоліком першого методу є великий обсяг можливих варіантів, що вимагає значних затрат часу. Реалізація другого методу можлива і доцільна тільки поблизу екстремальної точки. Тому для практичної реалізації запропоновано метод, який є поєднанням двох описаних. В комплексі з використанням області допустимих режимів та граничної області енергозатрат цей метод дає змогу зменшити затрати часу на пошук оптимального режиму в десятки разів.

Для оптимізації використовується метод пошуку глобального екстремуму функції мети, побудованої на основі диспетчерської інформації з врахуванням адаптації коефіцієнтів регресивного рівняння. При цьому частота адаптації коефіцієнтів регресивної моделі за даними диспетчерської інформації повинна задовольняти точності передбачення по моде-

лі для вибраного модельованого параметру режиму роботи газотранспортної системи.

Рішення задачі вибору оптимальних режимів газотранспортної системи визначається критерієм оптимізації і відповідним класом використовуваних моделей. Для моделювання режимів газотранспортної системи використовується апарат статистичної ідентифікації. Якість числових методів оптимізації характеризується такими факторами: областю збіжності алгоритму, часом виконання однієї ітерації, об'ємом пам'яті, необхідним для реалізації вибраного методу, класом задач, які розв'язуються і т. д.

Необхідно також враховувати особливості задач по розміреності оптимального вектора, багатоекстремальні, гладкі і негладкі задачі і т. д.

Тому один і той же метод може бути ефективним для одного типу задач і зовсім непридатним для іншого типу. У зв'язку з наведеними особливостями в даний час не існує найкращого у всіх відношеннях універсального числового методу оптимізації і ніколи не буде існувати. Тому необхідний не пошук універсального методу, а доцільніше об'єднати різні методи, які дозволяють з найбільшою ефективністю розв'язувати задачі оптимізації.

Одним з таких підходів є поєднання штрафних функцій з методом адаптивного випадкового пошуку. Сполучення цих методів дозволяє виключити зациклення ітераційних процедур пошуку екстремума в "особливих точках" за рахунок використання випадкового пошуку, тим самим підвищується надійність пошуку оптимального значення в цілому. Даний підхід дає можливість враховувати технологічні обмеження, які задаються функціями будь-якого виду за рахунок використання методу штрафних функцій при рішенні задач нелінійного програмування.

При даному підході до вирішення проблеми оптимізації транспорту газу в якості функції мети використовується регресивне рівняння, яке задається у вигляді параболи і технологічних обмежень у вигляді функцій обмежень для режимів роботи компресорних станцій вздовж траси трубопроводу. В цьому випадку задача оптимізації режимів роботи газотранспортної системи зводиться до таких дій:

- ♦ шукається  $\max_{X \in \Omega_p} (F(\bar{X}))$  функції мети  $F(\bar{X})$  при обмеженнях виду:

$$\begin{aligned} F_i(\bar{X}) &= 0; \quad i = 1, 2, \dots, l, \\ \varphi_j(\bar{X}) &\leq 0; \quad j = l + 1, \dots, m + 1, \dots, \end{aligned}$$

де  $\Omega_p$  – область працездатності для функції  $F(\bar{X})$ ;  $F(\bar{X})$  – цільова оптимізуюча функція (модель газотранспортної системи);  $F_i(\bar{X})$  – функція обмежень у вигляді рівності;  $\varphi_j(\bar{X})$  – функція обмежень у вигляді нерівності.

Задача розв'язується методом штрафних функцій, для чого будується функція штрафу такого вигляду:

$$P(X, \tau) = -F(X_k) + \tau \left( \sum_{i=1}^e F_i(X_k)^2 + \sum_{j=l+1}^m \varphi_j^\tau(X_k)^2 \right),$$

де  $\varphi_j^\tau(X_k) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \varphi_j(X_k) \leq 0 \\ \varphi_j(X_k), & \text{якщо } \varphi_j(X_k) > 0; \end{cases}$   $\tau$  – параметр штрафу.

Розглянемо задачу:

$$\max_{\tau \leq T} (\min_{X \in \Omega} (\rho(X, \tau))).$$

У багатьох роботах [130, 160, 172, 188] показано, що при  $T \rightarrow \infty$  рішення задачі зводиться до рішення попередньої загальної задачі. Вибравши значення штрафу  $\tau$  достатньо великим ( $\tau = 100$ ), градієнтним методом рішається тільки внутрішня задача.

Рекурентний алгоритм пошуку екстремуму наступний:

$$X_i(S) = X_i(S-1) - B' \cdot P'(X, \tau),$$

$$B' = \frac{C}{\sqrt{1+S}},$$

де  $i = 1, \dots, n$ ,  $n$  – число керуючих змінних;  $s$  – крок ітерації по схемі.

Значення штрафу змінюється від 0 до  $\tau_{\max}$  по закону:

$$\tau(S+1) = \tau(S) + \left( \sum_{i=1}^e F_i(X_k)^2 + \sum_{j=l+1}^m \varphi_j^\tau(X_k)^2 \right) \cdot \frac{C_1(\tau_{\max} - \tau(S))}{\sqrt{1+S}}.$$

Параметри  $C$  і  $C_1$  вибираються для конкретного виду функцій. Значення похідної в градієнтному методі обчислюється аналітичним або числовим методом через прирости  $\Delta X_j$ , тоді:

$$\rho'(X, \tau) = \frac{(\rho(X + \Delta X, \tau) - \rho(X - \Delta X, \tau))}{2\Delta X}.$$

Адаптивний випадковий пошук при правильній організації є достатньо ефективним засобом пошуку екстремуму. В області пошуку  $\Omega$ , яка включає область працездатності цільової функції і обмеження у виді рівності і нерівності в постановці загальної задачі, із заданою щільністю розподілу  $P(X/\bar{X}, \sigma_x^2)$  генеруються випадкові точки  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , де  $\bar{X}$  – математичне очікування;  $\sigma_x^2$  – дисперсія випадкової величини.

Алгоритм випадкового пошуку полягає в тому, що  $\bar{X}$  розміщується в точці з оптимальним або довільним значенням оптимізуючої функції, тобто:

$$F_k(\bar{X}) = \min(-F(\bar{X})) = Q^*.$$

Пошук  $Q^*$  проводиться на основі рекурентної процедури:

$$\bar{X} = X^* = \begin{cases} X_{i-1}; Q^* = Q_{i-1}^* & \text{при } Q(X_i) \leq Q_{i-1}^* \\ X_i; Q^* = Q_i^*(X) & \text{при } Q(X_i) < Q_{i-1}^* \end{cases},$$

де  $i$  – крок рекурентного пошуку.

Цей підхід гарантує знаходження глобального екстремуму при  $i \rightarrow N$ , де  $N$  – досить велике число.

Для задання режиму роботи алгоритму штрафних функцій вводяться:  $N_1$  – число ітерацій;  $L$  – вектор параметрів, він вміщує такі значення:

$$\tau_{\max}, l, m, c, c_1, \Delta x.$$

Також вводяться обмеження на допустиму область рішення задачі. Область працездатності моделі газотранспортної системи обмежується багатовимірним паралелепіпедом, який задає діапазони зміни незалежних змінних в матриці диспетчерської інформації  $X$ , по якій будувалась модель. Апроксимація робочої області таким методом не єдина, її також можна апроксимувати багатовимірним еліпсоїдом розсіювання, в будь-якому випадку метод оптимізації не обмежує класу функцій обмежень. Технологічні обмеження задаються обмежуючими нерівностями на режими компресорної станції (вхідні і вихідні тиски). Метод штрафних функцій при оптимізації працює першим, в деяких випадках краще, щоб перед методом штрафних функцій працював метод випадкового пошуку. Введення його принципово не ускладнює задачу оптимізації, зате підготує для штрафних функцій початкове значення для вектора  $\bar{X}_0$ , в якому виконуються всі обмеження. Якщо є можливість наперед підготувати початкове значення для вектора  $\bar{X}_0$ , то необхідність для введення цього випадкового пошуку відпадає. На виході методу штрафних функцій при оптимізації після  $N_1$  ітерацій формується вектор  $\bar{X}_1^*$  для якого  $Q_1 = F(\bar{X}_1^*)$ . Після цього використовується адаптивний випадковий пошук. Вхідним вектором для нього є вектор  $\bar{X}_1^*$ . Режим роботи якого задається параметрами  $N_2, \sigma_x^2$ . Основною задачею його є перевірка вектора  $\bar{X}_1^*$  на глобальний екстремум. На виході адаптивного випадкового пошуку формується вектор стану  $\bar{X}_2^* = \bar{X}_{\text{онт}}$ , який відповідає оптимальному керуванню по критерію максимуму перепускної спроможності на кінцевій компресорній станції для газотранспортної системи. Конкретний вигляд функції обмежень рівностей і нерівностей визначається технологічними обмеженнями для конкретних компресорних станцій. Необхідно зазначити, що обмеження у вигляді рівностей є найбільш складними обмеженнями для задач нелінійного програмування. У практичних розрахунках доцільно їх замінити обмеженнями у вигляді нерівності, для чого вводяться похибки вимірювань диспетчерських даних. В цьому випадку верхній і нижній діапазони для вимірювальних параметрів задає діапазон зміни і для функції обмеження, тим самим одне обмеження у вигляді рівності замінюють двома у вигляді нерівностей.

Даний підхід не є єдиним. Існує багато інваріантних підходів, але всі вони повинні давати швидкий пошук оптимального рішення задач для прийняття рішень в екстремальних умовах для забезпечення безаварійної та економічної роботи магістральних газопроводів

Задача побудови моделі газотранспортної системи пов'язана із задачею керування по моделі. Вибір критерію оптимізації визначається можливістю отримання оперативної інформації..

Оптимізація режимів роботи по критерію мінімальних енерговитрат на транспорт газу зводиться до побудови граничної області по енерговитратах для компресорної станції.

Розглянемо критерій мінімуму сумарних експлуатаційних витрат на транспорт газу. Необхідно зазначити, що експлуатаційні витрати на транспорт газу можуть бути зображені у вигляді суми:

$$E = E_0 + E_p, \quad (1)$$

де  $E_0$  – експлуатаційні витрати на транспорт газу, які не залежать від режиму роботи газопроводу. Сюди необхідно віднести зарплату із відрахуваннями, амортизаційні відрахування, затрати на утримання будинків і споруд;  $E_p$  – витрати на транспорт газу, які залежать від режиму роботи газотранспортної системи:

$$E_p = E_{nz} + E_m, \quad (2)$$

де  $E_{nz}$  – витрати на паливний газ;  $E_m$  – витрати на матеріали.

Витрати на паливний газ залежать від витрат паливного газу і можуть бути визначені за формулою:

$$E_{nz} = q_{nz} \cdot C_{nzi}, \quad (3)$$

де  $q_{nz}$  – витрати паливного газу як функція параметрів перекачування;  $C_{nzi}$  – вартість паливного газу на  $i$ -й компресорній станції. Необхідно зазначити, що величина  $C_{nzi}$  залежить від порядкового номера компресорної станції, із його збільшенням зростає.

Витрати паливного газу пропорційні фактичній потужності, затраченій на перекачування газу:

$$q_{nr} = K \cdot N, \quad (4)$$

де  $K$  – коефіцієнт пропорційності (витрати паливного газу на одиницю потужності). Величина коефіцієнта  $K$  вважається відомою для даного типу газоперекачувальних агрегатів, встановлених на компресорній станції.

Сумарна потужність компресорної станції може бути визначена з умов політропного стиску газу:

$$N = \frac{n}{(n-1) \cdot \eta} \cdot Q_B \cdot P_B \cdot \left( e^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) = 11.5 \cdot \frac{n}{n-1} \cdot Q \cdot T_B \cdot \left[ \left( \frac{P_H}{P_B} \right) - 1 \right] \cdot 10^{-3}, \quad (5)$$

де  $n = \frac{1}{\left( (1 - \ln(\varepsilon)) / \ln(T_{II} / T_B) \right)}$  – показник політропи стиску;  $T_{II}$ ,  $T_B$  – темпе-

ратура на виході і вході компресорної станції (дані беруться із диспетчерської інформації);  $\varepsilon$  – ступінь підвищення тиску на компресорній станції;  $Q$  – витрата газу при умовах всмоктування компресорної станції.

Таким чином, знаючи параметри режиму перекачування, можна визначити витрату паливного газу при цьому режимі і далі витрати на паливний газ.

Витрати на матеріали для транспортування газу також є функцією параметрів режиму роботи газопроводу. Однак отримати цю залежність в аналітичній формі неможливо. Тому для її побудови був застосований регресивний метод, який ґрунтується на кореляції статистичних даних по витратах на матеріали і показниках режиму роботи газопроводу “Братерство”.

При визначенні критерію оптимального режиму величина експлуатаційних витрат, яка не залежить від параметрів режиму перекачки, не є оцінкою раціональності режиму, оскільки оцінка якості режиму проводиться по різниці експлуатаційних витрат на  $i$ -му та  $i+1$ -му режимах.

Отже, розрахункова схема визначення критерію оптимальності і вибору оптимального режиму по одному критерію буде наступною. Для всіх режимів із області допустимих режимів роботи газотранспортної системи вибираються параметри роботи кожної з працюючих компресорних станцій (тиск і температура на вході і виході, продуктивність, ступінь підвищення тиску, потужність). Передбачається, що на кожному з заданих режимів система буде працювати однакові проміжки часу. Визначається кількість мотогодин для кожного газоперекачувального агрегату на кожній компресорній станції і розраховується повна сумарна робота  $N$ . Для кожного із режимів розраховуються витрати на паливний газ і матеріали. Оптимальний режим вибирається за мінімумом експлуатаційних витрат.

Недоліком вказаного підходу є його статистичний характер, адже ряд показників, які суттєво впливають на режим і залежать від нього, беруться усередненими на основі результатів статистики. До таких параметрів слід, в першу чергу, віднести ККД системи. В явному вигляді величина ККД використовується для визначення потужності КС за формулою (5), яка в принципі відображає потужність виключно нагнітача. Величини ККД газотурбінної установки та лінійної ділянки, які суттєво залежать від параметрів режиму, тут не враховуються. Очевидно, що усереднено вони враховуються коефіцієнтом  $K$  у (4) при визначенні витрати паливного газу, але впливом залежності цього коефіцієнта від режиму знехтувано.

З іншого боку коефіцієнт корисної дії газотранспортної системи може бути знайдений за параметрами роботи з наступної залежності

$$\eta = \frac{Q_{cm}}{q_{nz}} \cdot \frac{P_{cm}}{P_{cp}} \cdot \frac{T_{cp}}{T_{cm}} \cdot z_{cp} \cdot \frac{(P_n - P_k)}{Q_P^H}. \quad (6)$$

Залежність (6) містить наступні параметри режиму роботи системи транспорту газу: початковий  $P_n$ , кінцевий  $P_k$  та середній  $P_{cp}$  тиски, середню температуру  $T_{cp}$  та продуктивність при стандартних умовах  $Q_{cm}$ . Окрім того, у формулу входить витрата паливного газу по КС  $q_{nz}$  та його енергетична характеристика  $Q_P^H$ . Отже, при побудові регресійної залежності функції мети вираз ККД може бути включений як один із параметрів, що дозволить знайти екстремум задачі з урахуванням ефективності енергозатрат на транспортування газу.

За даними диспетчерської служби і з переліку цілей оптимізації видно, що для задач оптимального керування можна також використовувати критерій максимізації газопостачання.

Далі в якості вихідного моделюючого параметру використовується значення коефіцієнта корисної дії газотранспортної системи [58]. Вибір цього критерію оптимізації розглядається для ГТС, що складається з однієї КС і прилеглої лінійної ділянки. Для систем з більшою кількістю елементів принцип оптимізації за критерієм максимуму ККД залишається аналогічним.

Нехай ККД системи визначається залежністю (6). Використовуючи основне рівняння газопроводів

$$Q_{cm} = Cd^{2,5} \sqrt{\frac{P_n^2 - P_k^2}{\lambda \Delta z_{cp} T_{cp} L}}, \quad (7)$$

рівняння середньої температури і середнього тиску

$$T_{cp} = T_0 + \frac{T_n - T_0}{aL} (1 - e^{-aL}), \quad P_{cp} = \frac{2}{3} \left( P_n + \frac{P_k^2}{P_n + P_k} \right), \quad (8)$$

емпіричну формулу для коефіцієнта стисливості газу

$$z_{cp} = 1 - 5,5 \frac{P_{cp} \Delta^{1,3}}{T_{cp}^{3,3}}, \quad (9)$$

отримаємо залежність, яка виражає ККД системи через параметри режиму роботи ділянки газопроводу у вигляді

$$\eta = \frac{Cd^{2,5} \sqrt{\frac{P_n^2 - P_k^2}{\lambda \Delta z_{cp} T_{cp} L}}}{q_{nz}} \cdot \frac{P_{cm}}{T_{cm}} \cdot \frac{T_0 + \frac{T_n - T_0}{aL} (1 - e^{-aL})}{\frac{2}{3} \left( P_n + \frac{P_k^2}{P_n + P_k} \right)} \cdot \left( 1 - 5,5 \frac{P_{cp} \Delta^{1,3}}{T_{cp}^{3,3}} \right) \cdot \frac{(P_n - P_k)}{Q_P^H}, \quad (10)$$



де  $a = \frac{\pi k_T D}{Q_{cm} \Delta C_p}$ ,  $C$  – коефіцієнт пропорційності;  $T_0$  – температура ґрунту;  $k_T$  – повний коефіцієнт теплопередачі від газу до ґрунту;  $q_{nz}$  – витрата паливного газу, яка пропорційна наявній потужності.

Використавши (4) і (5) отримаємо

$$q_{nz} = K \left( \frac{n}{n-1} Q_{cm} T_B \left( \left( \frac{P_n}{P_B} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) \right). \quad (11)$$

З урахуванням (11) вираз (10) матиме вигляд

$$\eta = \frac{Cd^{2,5} \sqrt{\frac{P_n^2 - P_K^2}{\lambda \Delta z_{cp} T_{cp} L}} \cdot \frac{P_{cm}}{T_{cm}} \cdot \frac{T_0 + \frac{T_n - T_0}{aL} (1 - e^{-aL})}{\frac{2}{3} (P_n + \frac{P_K^2}{P_n + P_K})} \times \quad (12)$$

$$\times (1 - 5,5 \frac{P_{cp} \Delta^{1,3}}{T_{cp}^{3,3}}) \cdot \frac{(P_n - P_K)}{Q_P^H}.$$

Одержаний вираз (12) зв'язує ККД системи з параметрами режиму роботи. Для визначення оптимальних параметрів режиму необхідно відшукати глобальний екстремум (максимум) виразу з системи алгебраїчних рівнянь

$$\frac{\partial \eta}{\partial P_n} = 0; \frac{\partial \eta}{\partial P_K} = 0; \frac{\partial \eta}{\partial T_n} = 0; \frac{\partial \eta}{\partial P_B} = 0; \frac{\partial \eta}{\partial T_B} = 0. \quad (13)$$

Однак, при реалізації задачі виникають труднощі обчислювального характеру. По-перше, система (13) є нелінійною, що утруднює аналітичні методи розв'язку. По-друге, ряд констант в (12) включають неявні залежності від параметрів режиму (наприклад, величини  $q_{nz}$  і  $a$  залежать від пропускної здатності  $Q_{cm}$ ). Тому більш раціональним є метод пошуку глобального максимуму шляхом випадкового адаптивного пошуку за наступним алгоритмом.

1. В початковому наближенні задаються параметри режиму початковий  $P_n^{(s=0)} = P_{n \min}$  і кінцевий  $P_K^{(s=0)} = P_{K \max}$  тиски, початкова температура  $T_n^{(s=0)}$ , а також відомими вважаються геометричні параметри газопроводу і фізичні властивості газу.

2. Розраховуються за (8) середні значення параметрів режиму і за (9) коефіцієнт стисливості газу.

3. Розраховується за (7) пропускна здатність газопроводу і за (11) витрата паливного газу; уточнюються параметр  $a$ , середня температура і коефіцієнт стисливості при середніх параметрах.

4. Уточнюються пропускна здатність і витрата паливного газу. Після досягнення заданої точності знаходять ККД з (6). Таким чином, для заданих параметрів режиму (тисків і температури) отримано значення пропускної здатності, витрати паливного газу і значення ККД. Розраховані значення вважаються базовими, всі подальші значення визначаються по відношенню до базових.

5. Надається певний приріст початковому значенню тиску  $P_n^{(s+1)} = P_n^{(s)} + \Delta P$  ( $s$  – номер ітерації) і контролюється обмеження  $P_n^{(s+1)} \leq P_{n\max}$ ; далі розрахунок повторюється за заданою схемою, в результаті отримують нові значення пропускної здатності, витрати паливного газу і значення ККД, які нормуються по відношенню до базових.

6. Якщо отримані нормовані безрозмірні значення параметрів ( $s + 1$  ітерація) збільшуються порівняно з попередніми ( $s$  ітерація), то надається новий приріст значенню початкового тиску і виконуються розрахунки нової ітерації. Якщо на певній ітерації спостерігається зменшення всіх розрахункових параметрів (пропускної здатності, витрати паливного газу і значення ККД) або значення довільного параметра виходять за межі області допустимих режимів, то переходять до зміни наступного параметра (кінцевого тиску) і всі розрахунки повторюють за вказаним алгоритмом.

7. В результаті застосування методу адаптивного випадкового пошуку отримують залежності розрахункових параметрів (пропускної здатності, витрати паливного газу і значення ККД) від незалежних характеристик режиму (початкового і кінцевого тисків, початкової температури). Аналізуючи результати розрахунків визначають глобальний максимум, який відповідає оптимальному режиму.

Як приклад, проведено розрахунки з оптимізації режиму роботи гіпотетичного газопроводу, по якому перекачується метан і який складається з однієї лінійної ділянки діаметром 1420x20 мм і довжиною 127 км, та компресорної станції, обладнаної газоперекачувальними агрегатами ГТН-25І з нагнітачем 650-24-11. Розрахунки проводилися за приведеним алгоритмом, за результатами побудовано графічні залежності, які подано на рис. 1.

З рис. 1 видно, що максимальне значення функції мети (величини ККД системи) досягається при практично однакових значеннях тисків (в порівнянні з базовими значеннями). Це свідчить про наявність глобального екстремуму задачі. Зауважимо, що оптимум початкової температури в задачі не розглядався, оскільки максимум функції мети лежить за межами області допустимих режимів.

Шляхом виключення робочих тисків з результатів рішення задачі на основі основного рівняння газопроводів приходимо до залежності функції мети від пропускної здатності (продуктивності) системи (рис. 2). На графік накладено залежність енерговитрат на транспорт газу від

обсягу перекачування, яка також має максимум. Однак, оптимальне значення продуктивності газопроводу за критерієм максимуму ККД зміщене в порівнянні з аналогом за критерієм максимуму енергорвитрат на транспорт газу на величину 12,7% в більшу сторону. Це свідчить про необхідність врахування ККД в якості критерію оптимальності при вирішенні задачі оптимізації режимів.

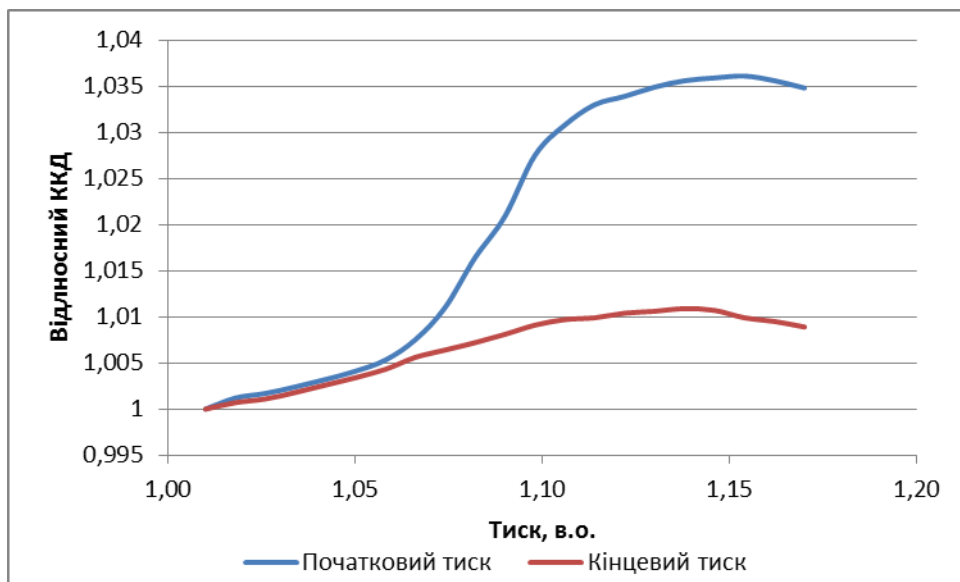


Рис. 1. Залежність ККД від тисків на початку і в кінці ділянки

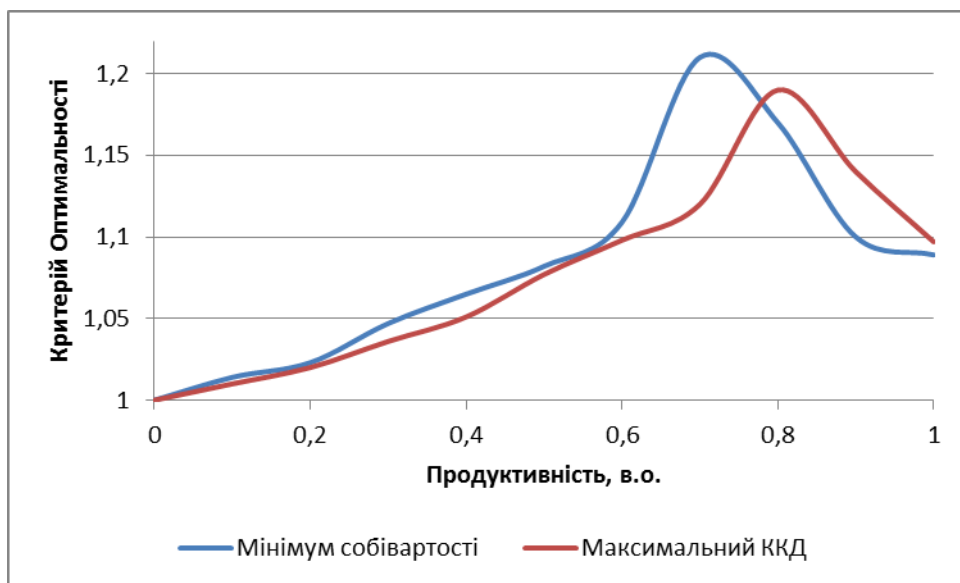


Рис. 2. Результати оптимізації режимів роботи газопроводу

На сьогодні роль наріжного каменю управлінської політики галузевого рівня відіграють показники витрат паливно-енергетичних ресурсів на компресорних станціях магістральних газопроводів. Традиційно обсяги витрат паливно-енергетичних ресурсів визначались за рівнем технологічно оптимальної (максимальної) пропускної спроможності магістральних газопроводів. В умовах ринкової економіки витрати енергетичних ресурсів і обсяги транспортованого газу підпорядковані і визначаються за критерієм оптимальності економічного змісту, а саме – надходжень коштів за виконуваним газотранспортною роботою. Останні визначаються за приписами ринкової економіки, або ситуаційно, і це диктує концептуально нову схему розв'язку проблеми нормування витрат паливно-енергетичних ресурсів на трубопровідний транспорт газу. Провідна ідея ринкової концепції витрат паливного газу зводиться до побудови якісно нової інтегрованої системи критеріальних показників ефективності витрат технологічного і економічного походження, в якій домінують економічні фактори.

Традиційно газотранспортна робота магістральних газопроводів оцінюється добутком кількості транспортованого газу  $Q$  на відстань  $L$ . Вимірник газотранспортної роботи  $Q \cdot L$  ( $\text{м}^3 \cdot \text{км}$ ) за певний період є аналогічним вимірнику звичайних вантажоперевезень ( $\text{кг} \cdot \text{км}$ ). Проте, фізична природа звичайних вантажоперевезень і трубопровідного транспортування газу різна. Відмінність полягає в тому, що вантаж, зазвичай, є пасивним переміщуваним предметом, а газ є носієм енергії тиску, яка уможливорює сам процес транспортування газу.

Енергія тиску змінює фізичний стан транспортованого газу (густину, температуру і тиск) по довжині газопроводу. Через це енергетичні витрати на транспортування газу залежать від кількості транспортованого газу неоднозначно. Ця неоднозначність не дозволяє використати успадковану традиційну товаротранспортну роботу  $Q \cdot L$  в якості універсального вимірника “продукції” газотранспортного виробництва. Товаротранспортна робота  $Q \cdot L$  може використовуватись тільки у випадках співставних режимно-технологічних варіантів транспортування газу. Можна відзначити і таке: для фіксованої довжини газопроводу і фіксованих шляхових відборах і надходженнях газу вимірником продукції може слугувати обсяг транспортованого газу за довільно визначений період, тобто продуктивність газопроводу. Продуктивність газопроводу є інтегральним показником. Отже, при з'ясуванні причин відхилення експлуатаційних режимів газопроводів від проектних чи планових, або технічно можливих необхідно використовувати поняття пропускної здатності газопроводу, яке визначає максимальний обсяг транспортованого газу при максимальному використанні потужностей компресорних станцій і фактичних розрахункових параметрах транспортування газу.

Для лінійної ділянки газопроводу еквівалентна товаротransпортна робота розраховується за формулою

$$A = c(P_{21} - P_{22})Q, \quad (10)$$

де  $c$  – константа, яка розраховується за параметрами лінійної ділянки;  $P_1$ ,  $P_2$  – тиски на початку і в кінці ділянки;  $Q$  – продуктивність газопроводу.

Як показано в [ 44 ], для визначення ККД газопроводу справедлива залежність

$$\eta = \frac{Q_{cm}}{q_{nc}} \cdot \frac{P_{cm}}{P_{cp}} \cdot \frac{T_{cp}}{T_{cm}} \cdot z_{cp} \cdot \frac{(P_1 - P_2)}{Q_P^H}. \quad (11)$$

Сумісний розв'язок (10) і (11) дає формулу для товаротransпортної роботи у вигляді

$$A = 2c \frac{\eta}{z_{cp}} q_{nc} P_{cp}^2 \frac{T_{cm}}{q_{nc}} \cdot \frac{Q_P^H}{P_{cn}} \cdot \frac{T_{cm}}{T_{cp}}. \quad (12)$$

Для компресорної станції в межах концепції еквівалентної товаротransпортної роботи політропна робота стискування газу визначається за формулою

$$N_{ГПА} = \frac{m}{(m-1) \cdot \eta_{пол}} \cdot P_{ex} \cdot Q_{ex} \left[ \varepsilon^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right],$$

де  $\varepsilon$  – ступінь стискування газу,  $zH$  і  $TH$  – коефіцієнт стискуваності і температура газу на вході компресорної станції,  $Q$  – продуктивність КС.

Оскільки непроекtnі режими експлуатації магістральних газопроводів в ринкових умовах не є винятковими і їх ефективність має оцінюватися за економічними критеріями прибутковості, то проблема формування ринково-орієнтованого вимірника продукції газотransпортного виробництва є надзвичайно загостреною. Ринково-орієнтований підхід до її розв'язку пролягає через удосконалення і унормування методичної бази розрахунків непроекtnих режимів роботи магістральних газопроводів. Непроєктно орієнтовані методи розрахунків виконуваної газотransпортної роботи (виробничої функції) в системах трубопровідного транспорту газу мають спиратися на адекватні моделі законів газової термодинаміки щодо основних технологічних процесів, які відбуваються в газопроводі: розширення газу в лінійних ділянках і стискування газу на компресорних станціях з врахуванням ККД.

Однією з гостро актуальних проблем транспортування газу є визначення оптимальної продуктивності магістрального газопроводу.

Доринкова порівняльна оцінка експлуатаційних варіантів транспортування газу зводилась до визначення найменшого значення питомих приведених витрат для різних обсягів транспортованого газу.

Щоб повернути механізм підходу до формування методичної бази підвищення ефективності магістральних газопроводів у ринкову пло-

щину, належить керуватися методичними стандартами ринкової економіки, як ідеологічним інструментом аналізу та оцінювання економічної ефективності використання основних фондів та керовано змінних паливно-енергетичних ресурсів.

Економічним змістом проблеми оцінювання і підвищення ефективності експлуатаційних режимів роботи магістральних газопроводів є визначення залежності витрат енергетичних ресурсів  $N$  від кількості транспортованого газу  $Q$  та економічної ефективності цих витрат за ринковим критерієм прибутковості [1]

$$\Pi_p = f(O\Phi, N),$$

де  $O\Phi$  – витрати, що є незалежними від завантаження газотранспортної системи (витрати на обслуговування основних виробничих фондів  $O\Phi$ ), а  $N$  – керовано змінні в короткостроковому періоді витрати (енергетичні та ін.), що залежать від обсягів транспортованого газу, тобто  $N = f(Q)$ . Технологічному змісту проблеми відповідає її математичне формулювання, сутність якого можна умовно поділити на дві частини:

1) – побудова цільової, критеріально екстремальної функції  $N = f(Q)$ ;

2) – знаходження екстремуму функції  $N = f(Q)$  при обмеженнях, які накладає формула прибутковості  $\Pi_p = f(O\Phi, N)$ .

За результатами розрахунків нижче наведена графічна модель залежності  $\Delta P = f(Q)$  для лінійної ділянки Борова – Першотравнева газопроводу «Союз». Аналіз одержаних результатів дозволяє стверджувати наступне: залежність витрат в лінійних ділянках енергії тиску газу  $\Delta P$  від обсягів транспортованого газу  $Q$  є нелінійною. Специфічність нелінійної характеристики  $\Delta P = f(Q)$  проявляється в тому, що вона є вогнутою донизу. Саме ця її особливість дає можливість віднайти шляхом порівняння результатів розрахунків надходжень за кількістю транспортованого газу  $Q$  з результатами розрахунків енергетичних витрат  $\Delta P = f(Q)$  оптимальний за показником енергоефективності режим роботи лінійної ділянки газопроводу. За оптимального режиму роботи лінійної ділянки надходження будуть більші, ніж витрати енергоресурсів  $\Delta P$ .

Саме ця її особливість дає можливість віднайти шляхом порівняння результатів розрахунків надходжень за кількістю транспортованого газу  $Q$  з результатами розрахунків енергетичних витрат  $\Delta P = f(Q)$  оптимальний за показником енергоефективності режим роботи лінійної ділянки газопроводу. За оптимального режиму роботи лінійної ділянки надходження будуть більші, ніж витрати енергоресурсів  $\Delta P$ , тобто

$$H_{ad} = \eta \times Q > \Delta P = f(Q).$$

Концепція оптимізації режимів роботи лінійних ділянок відіграє ключову роль у формуванні енергоефективних технологій трубопровідного транспортування газу. Проте слід мати на увазі, що для магістральних газопроводів високого тиску витрати  $\Delta P$  залежать не тільки від завантаження газопроводу, а й від безпосередньо керованих режимів роботи (робочого тиску) компресорних станцій. Енерговитрати на лінійних ділянках взаємопов'язані з енерговитратами на КС і є важливим, проте похідним складником показника ефективності магістральних газопроводів.

Технологічні розрахунки трубопровідного транспорту газу ґрунтуються на використанні приведених термогазодинамічних характеристик відцентрових нагнітачів. В той же час стандартне відтворення цих характеристик не задовольняє потреби в розрахунках непроекtnих режимів роботи магістральних газопроводів, які супроводжують зміну продуктивності газопроводу в діапазоні  $0 - Q_{\max}$ . В зв'язку з цим у практику розрахунків режимів роботи газопроводів введені моделі газоперекачувальних агрегатів з урахуванням їх ККД за результатами діагностування, які дозволяють визначати технологічні параметри роботи КС в експлуатаційних умовах.

Графічно ілюстрована концепція оптимізації режимів роботи магістральних газопроводів є стрижнем ринкового підходу до формування нової ринково орієнтованої методології аналізу, оцінювання та підвищення ефективності трубопровідного транспорту газу.

Виробничі потужності газотранспортних структур залишаються фіксованими в межах короткострокового періоду, але обсяг транспортованого газу може бути змінений шляхом зміни режимів роботи системи газопроводів, а отже і витрат енергетичних ресурсів на КС газопроводів. Центральним аспектом цієї проблеми є питання: як буде змінюватись кількість продукції, що виробляється (виконуваної газотранспортної роботи) при збільшенні витрат оперативно змінюваних потужностей КС, але фіксованих, незмінюваних у короткостроковому періоді інших ресурсах.

Відповідь на це питання дає залежність потужності КС від параметрів роботи і, зокрема, ККД ГПА. Ця залежність є такою, що має нелінійно змінювану пропорцію, яка з деякого моменту (сідлової точки) зменшується. Отже, віддача від збільшення витрат змінних ресурсів (енергетичних ресурсів КС) є зменшуваною. Ця закономірність в економіці відома як "закон зменшуваної віддачі" [4].

Логічне пояснення цьому закону стосовно магістральних газопроводів впливає з сутності фізики газотермодинамічних процесів транспортування газу, а саме: витрати енергії на подолання опору тертя зростають нелінійно залежно від потужності газового потоку.

З метою дослідження поведінки співвідношення між витратами ресурсів і віддачею як характеристики середньої віддачі від збільшення витрат енергетичних ресурсів проведено розрахунки середньої віддачі СВ (виробничої продуктивності) газопроводу “Союз”.

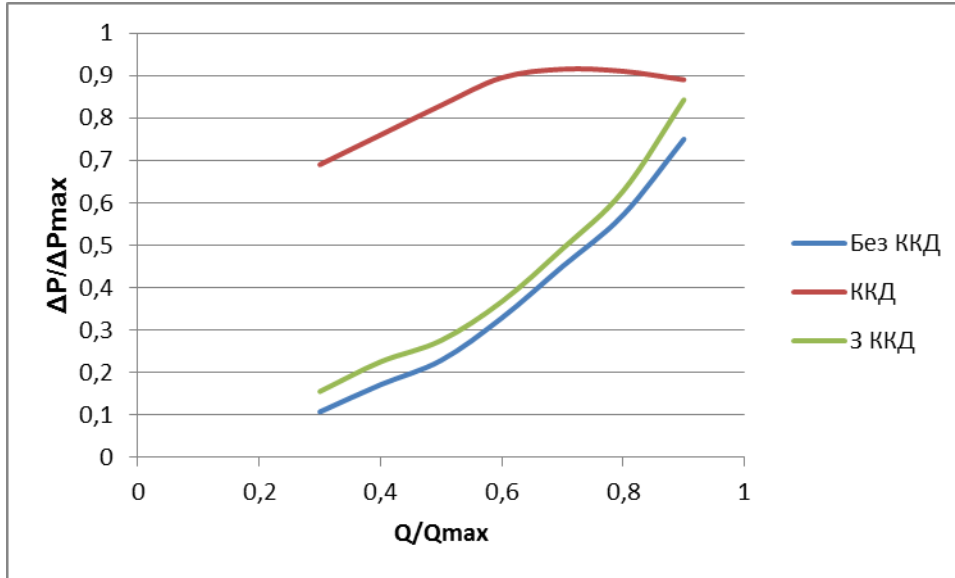


Рис. 3. Графічна модель залежності витрат енергії тиску газу  $\Delta P = P_{поч} - P_k$  від продуктивності  $Q$  лінійної ділянки Борова – Першотравнева

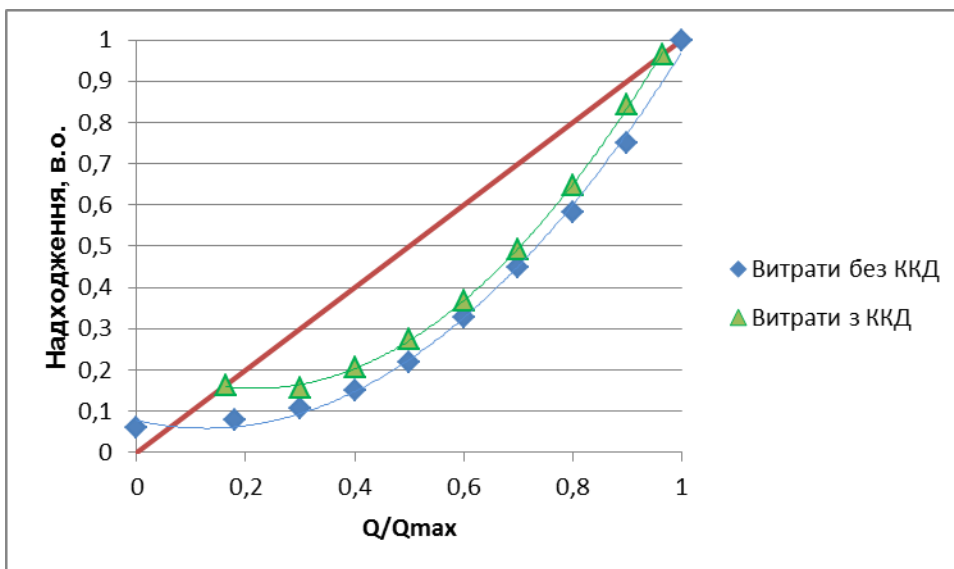
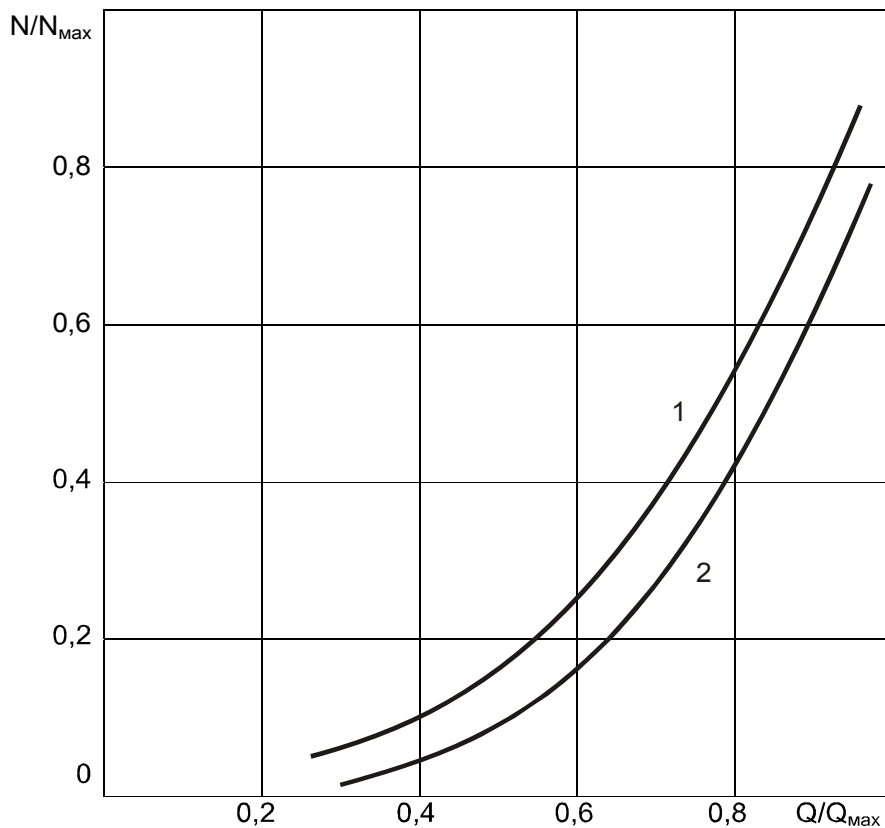


Рис. 4. Оптимальний режим для лінійної ділянки Борова – Першотравнева за показником  $(H_{ao} - \Delta P) \rightarrow \max$



Другу характеристику ефективності функціонування газопроводів становить показник граничної віддачі від використання керованих енергетичних ресурсів. Цей показник є похідним від показника середньої віддачі СВ.



1. ККД=0,25; 2. ККД=0,30.

Рис. 5. Порівняльні графіки виробничих функцій Машівка КС при різних значеннях ККД

Показник граничної віддачі ГВ вимірює темп зміни загального обсягу виробництва (кількості транспортованого газу  $Q_{\text{гтр}}$ ) і проходить ті ж три фази, через які проходить показник середньої віддачі СВ. Якщо обсяг транспортованого газу зростає зі збільшенням швидкості, то гранична віддача теж зростає. Потім, обсяг виробництва зростає, але зі зменшеною швидкістю; гранична віддача залишається позитивною (плюсовою), але знижується. Коли обсяг транспортованого газу досягає максимальної точки, то гранична віддача дорівнює нулю.

Динаміка граничної віддачі є такою ж дугоподібною, як і залежність середніх витрат від кількості транспортованого газу. Але має місце суттєва відмінність: там, де гранична віддача перевищує середню

віддачу, остання зростає; а там, де гранична віддача менше середньої, середня віддача знижується. Звідси випливає, що крива граничної віддачі ГВ перетинає криву середньої віддачі якраз в тій точці, в якій остання досягає свого максимуму.

Показник граничної віддачі витрат енергоресурсів є центральним. Його побудова спирається на ідеологію формування виробничої функції в координатах: питомі витрати енергетичних ресурсів – обсяг транспортованого газу. Ця ідеологія постулює, що інтересам галузі на перспективу відповідає не менше за обсягом, а найбільш ефективно використання паливно-енергетичних ресурсів за показником граничної віддачі ГВ.

Щоб визначити загальні витрати на транспортування газу та витрати з розрахунку на одиницю транспортованого газу, необхідно об'єднати дані про виробничу функцію, яка ілюструє закон зменшуваної віддачі, з інформацією на ціни використовуваних ресурсів [4].

Концепція граничних витрат має стратегічне значення, оскільки вона дозволяє визначити ті витрати, величину яких газотранспортна структура може контролювати безпосередньо. Показники середніх витрат такої можливості не дають.

Завантаження газопроводу, при якому енергетичні витрати починають зростати стрімкіше є оптимальним  $Q_{opt}$ . За оптимального режиму роботи газопроводу загальні витрати основних фондів  $O\Phi$  та енергетичних ресурсів  $N_{kc}$  на транспортування газу є меншими, ніж при подальшому завантаженні газопроводу.

Отже, якщо розраховувати собівартість газотранспортного виробництва за обсягом транспортованого газу  $Q_{max}$ , то збільшення обсягів транспортування газу  $Q_{opt} < Q_{max}$ , тобто більш повне використання задіяних у виробництві ресурсів є збитковим. Цей парадокс командної економіки у ринковому середовищі спрацьовує як руйнівний фактор і мотивує необхідність і невідкладність глибокого аналізу сутності ринково-орієнтованого методу аналізу і підвищення ефективності трубопровідного транспорту газу.

Ідеологія ринково орієнтованого аналізу, оцінювання та використання методологічних засобів підвищення ефективності трубопровідного транспорту газу при повному завантаженні магістральних газопроводів пропонується такою [2]:

1. Оцінюємо надходження за командною і ринковою схемою. За командною схемою надходження при  $Q_{max}$  становлять

$$HQ = C_Q \times Q_{max} = O\Phi + N_{kc.max}$$

2. Вартість транспортування одиниці транспортованого газу (ціна)

$$C_Q = \frac{O\Phi + N_{kc.max}}{Q_{max}}$$

3. За ринковою схемою надходження визначаються як добуток ціни одиниці виконуваної газотранспортної роботи на її величину

$$HQ = C_Q \times U_{\text{стр}},$$

де  $C_Q$  – ціна одиниці виконуваної газотранспортної роботи  $U_{\text{стр}}$ .

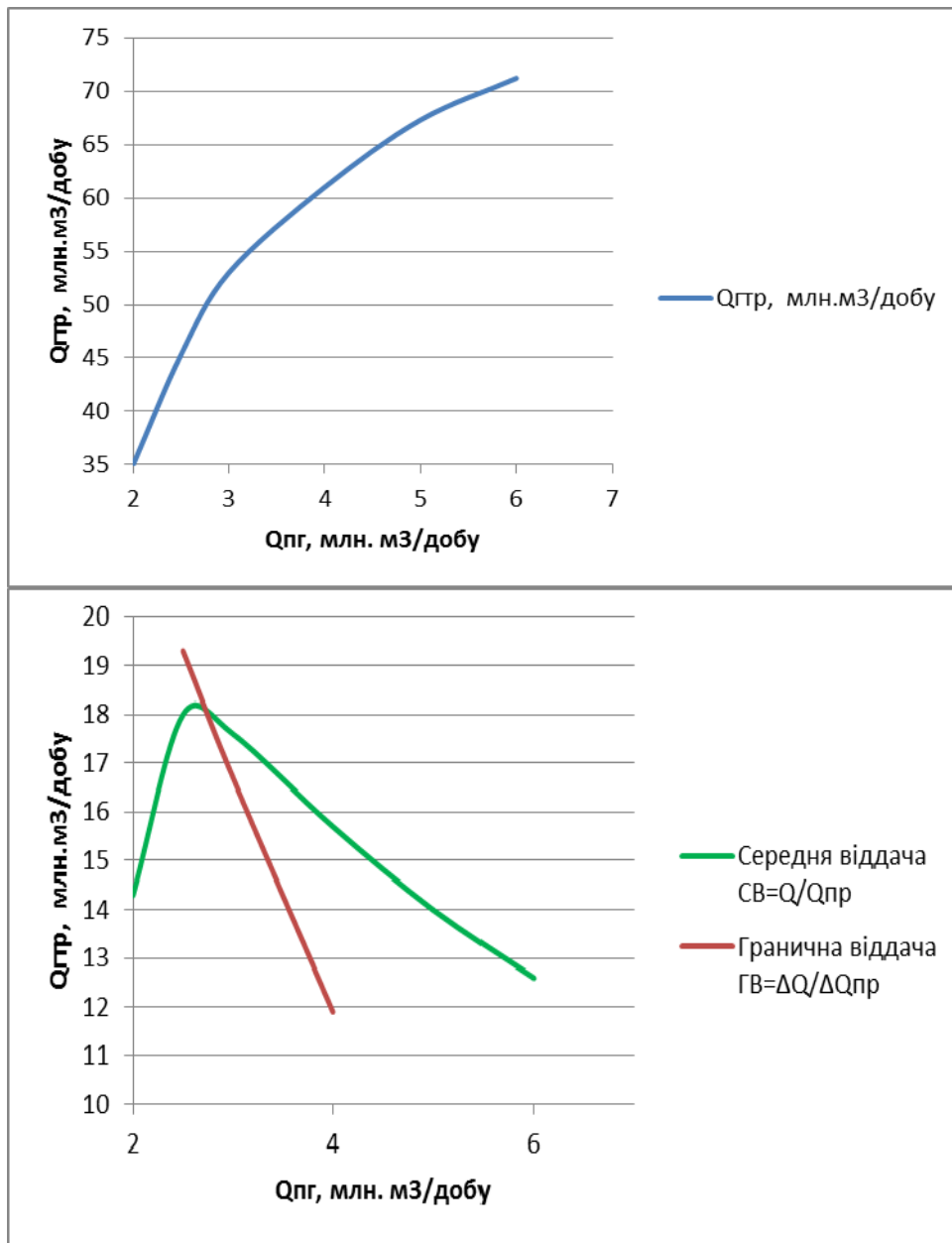


Рис. 6. Залежність між загальним обсягом транспортованого газу  $Q_{\text{стр}}$ , витратами паливного газу  $Q_{\text{пг}}$  та середньою  $СВ$  і граничною віддачею  $ГВ$  магістрального газопроводу “Союз”

4. У точці, де загальні витрати мінімальні, покладемо

$$C_Q \times Q_{ОПТ} = C_{зпр} \times U_{ОПТ} = \left( \frac{O\Phi + N_{к.маx}}{Q_{маx}} \right) \times Q_{ОПТ}.$$

5. Звідси вартість одиниці виконуваної газотранспортної роботи  $U_{зпр}$  становить

$$C_{зпр} = \left( \frac{O\Phi + N_{к.маx}}{Q_{маx}} \right) \times \frac{Q_{ОПТ}}{U_{ОПТ}}.$$

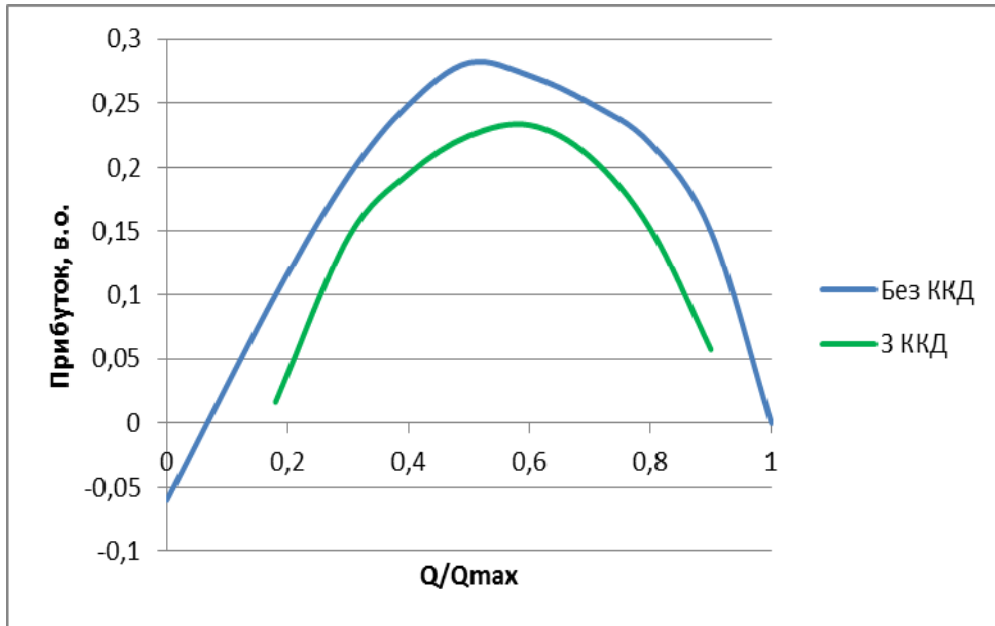


Рис. 7. Ефективність трубопровідного транспорту газу для газопроводу Союз

6. Отже, в будь-якій точці оптимізаційної області надходження такі: за ринковою схемою

$$H_{зпр} = C_{зпр} \times U_{зпр} = \left( \frac{O\Phi + N_{к.маx}}{Q_{маx}} \right) \times \frac{Q_{ОПТ}}{U_{ОПТ}} \times U_{зпр},$$

$$H_Q = C_Q \times Q = \frac{O\Phi + N_{к.маx}}{Q_{маx}} \times Q.$$

а за командною (витратною) схемою

$$H_Q = C_Q \times Q = \frac{O\Phi + N_{к.маx}}{Q_{маx}} \times Q$$

7. Різниця між надходженнями  $H_{зпр}$  і  $H_Q$  за будь-якого завантаження газопроводу становить

$$H_{зmp} - H_Q = \frac{N_{кc. max}}{Q_{max}} \times \left[ \left( \frac{Q_{max}}{N_{кc. ОПТ}} \right) \times U_{зmp} \right] - Q,$$

$$H_{зmp} - H_Q = \frac{O\Phi + N_{кc. max}}{Q_{max}} \times \left[ \left( \frac{Q_{ОПТ}}{N_{кc. ОПТ}} \right) \times U_{зmp. max} \right] - Q_{max}.$$

Ця різниця, отже і прибуток  $P_p$ , визначений як різниця між повною виручкою і всіма витратами, при максимальному завантаженні газопроводу становить:

$$P_p = H_{зmp} - H_Q = (O\Phi + N_{кc. max}) \times \left[ \left( \frac{Q_{ОПТ}}{Q_{max}} \times \frac{N_{кc. max}}{N_{кc. ОПТ}} \right) - 1 \right].$$

8. Якщо витрати на обслуговування основних фондів  $O\Phi$  надмірні і такі, що  $Q_{онт} = Q_{max}$  і, отже,  $Q_{кc.онт} = Q_{кc. max}$ , то прибуток  $P_p = H_{зmp} - H_Q$  буде нульовим, тобто, газотранспортне виробництво за ринковими орієнтирами буде економічно збитковим.

Запропонована методологія оптимізації технологічних процесів реалізована для прикладу оптимізації режимів трубопровідного транспорту газу, однак принцип може бути застосований для різних технологій, зокрема процесу обслуговування об'єктів газотранспортного комплексу.

Таким чином, уперше вдосконалено принцип оптимізації режимів роботи магістральних газопроводів шляхом побудови функції мети, яка містить в якості складової структури врахування величини ККД і закономірності впливу на його величину параметрів режиму роботи.

Показано, що врахування величини ККД системи транспорту газу може суттєво вплинути на величину параметрів оптимального режиму роботи системи і змінити величину оптимальної пропускної здатності в залежності від параметрів в кожному сторону.

Створено концептуально нову наукову основу для оцінювання, прогнозування та підвищення ефективності трубопровідного транспортування газу з урахуванням закономірностей залежності ККД від параметрів режиму в умовах формування ринкових відносин.

### *Література*

1. Будзуляк Б.В. Методология повышения эффективности эксплуатации системы трубопроводного транспорта газа на стадии развития и реконструкции / Б.В. Будзуляк. – Москва, НЕДРА, 2003. – 170 с.
2. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем / Н.П. Бусленко. – М.: Наука, 1978. – 399 с.
3. Грудз Я.В. Энергоэффективность газотранспортных систем / Я.В. Грудз. – Ивано-Франківськ: Лілея-НВ, 2012. – 208 с.

4. Грудз В.Я. Технічна діагностика трубопровідних систем / В.Я.Грудз, Я.В.Грудз, В.В.Костів та ін. – Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2012. – 512 с.
5. Грудз Я.В. Оптимізація режимів роботи газопроводу з урахуванням енерговитратності транспорту газу / Я.В. Грудз // Нафтогазова енергетика. – 2012 – №2. – С. 12-15.
6. Orynyak I.V. The spring splines procedure with prescribed accuracy for determination of the curvatures of the pipeline based on the 3-D measurements of its position / I.V.Orynyak, I.V.Lokhman // Rio Pipeline Conference & Exposition 2011, IBP1029\_11.

*Стаття надійшла до редакційної колегії 20.12.2013 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., професором Тимківим Д.Ф.,  
д.т.н., професором Говдяком Р.М. (м. Київ)*

## PRINCIPLES OF OPTIMIZATION OF MODES WORKS OF GAS PIPELINE

**Y. V. Grudz**

*Ivano-Frankivs 'k National Technical University of Oil and Gas;  
76019, Ivano-Frankivs 'k, Carpats 'ka str., 15;  
ph. +380 (3422) 4-21-57; e-mail: public@nung.edu.ua*

*Principles of optimization of office hours of main gas pipelines and difficult gas-transport systems are resulted with the use of various criteria of optimum. The method of optimization of office hours GTS is offered in the conditions of transition to the market relations.*

**Key words:** *great number of the modes, criteria of optimum, optimization.*