

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГАЗОПРОВОДУ З УРАХУВАННЯМ ЕНЕРГОВИТРАТНОСТІ ТРАНСПОРТУ ГАЗУ

Я.В. Грудз

ІФНТУНГ, 76019, м.Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42157,
e-mail: public@nuing.edu.ua

Розглядаються питання впливу енергетичної ефективності використання паливного газу на вибір раціональних режимів експлуатації газотранспортних систем в умовах ринкової економіки. Показано залежність коефіцієнта корисної дії газотранспортної системи від обсягу перекачування газу, і на її основі побудовано виробничі функції компресорних станцій і лінійних ділянок з урахуванням корисного використання енергоресурсів. Проведено техніко-економічний аналіз ефективності перекачування газу при різних режимах, в результаті якого встановлено залежність витрат на транспортування газу від параметрів режиму роботи. Оптимальний режим роботи газотранспортної системи визначається максимумом різниці між надходженнями і витратами на транспортування газу. Наведено приклади розрахунків і побудови моделей для умов транспортування газу газопроводом «Союз».

Ключові слова: газопровід, оптимальний режим, енергетична ефективність

Рассматриваются вопросы влияния энергетической эффективности использования топливного газа на выбор рациональных режимов эксплуатации газотранспортных систем в условиях рыночной экономики. Показана зависимость коэффициента полезного действия газотранспортной системы от объема перекачивания газа, и на ее основе построены производственные функции компрессорных станций и линейных участков с учетом полезного использования энергетических ресурсов. Проведен технико-экономический анализ эффективности перекачивания газа при разных режимах, в результате которого установлена зависимость расходов на транспортировку газа от параметров режима. Оптимальный режим работы газотранспортной системы определяется максимумом разницы между поступлениями и расходами на транспорт газа. Приведены примеры расчетов и построения моделей для условий транспортировки газа по газопроводу «Союз».

Ключевые слова: газопровод, оптимальный режим, энергетическая эффективность.

It is considered how energy efficiency of the fuel gas depends on the rational choice of gas transmission systems operation modes, in a market economy. It is illustrated estimated calculated how the efficiency factor of gas transportation system depends on the amount of gas pumped, and on this basis production functions of both compressor stations and linear transport sections line sections are built, with special focus at constructive use of power resources. Technical and economic analyses of gas pumping efficiency at different modes are conducted; as a result the dependence of gas transportation costs on gas pumping mode parameters is established. Optimum performance of the gas transmission system is determined by the maximum difference in gas transportation income and expenditure (receipt and consumption). Examples of Calculations and modelling conditions for gas transportation on the pipeline "Soyuz" are offered.

Keywords: gas pipeline, optimum mode, power efficiency.

Постановка проблеми. Велика енергоємність об'єктів системи трубопровідного транспортування газу вимагає раціонального використання енергоносіїв. Адже навіть незначний відсоток зниження коефіцієнта корисної дії газоперекачувальних агрегатів призведе до суттєвих перевитрат енергії на перекачування газу. Тому проблема енерговикористання і пов'язана з нею проблема оптимізації режимів роботи газопроводів є актуальними.

Аналіз результатів досліджень. Слід зауважити, що при оцінці ефективності використання двигунів на компресорних станціях (як газотурбінних, так і електричних) здавна прийнято використовувати ККД машини, і що дало змогу ранжувати двигуни в ряд за принципом корисного використання енергії, що, в свою чергу, дозволило створити конкурентноздатний ряд газоперекачувальних агрегатів, яким користуються при проектуванні компресорних станцій, зокрема при виборі їх обладнання[1,2]. Однак, такий підхід вирішує лише часткову

задачу економії енергоресурсів при транспортуванні газу, оскільки кінцевою метою є не процес компримування газу, а більш загальний процес його транспортування[3]. Тому підхід до оптимізації компримування газу ще не виключає більш загального підходу до оптимізації процесу його транспортування. Більше того, ККД системи повинен бути основним (або одним із основних) критерієм оптимальності процесу керування режимами газотранспортної системи, оскільки стратегія оптимізації технологічного процесу чи технічного рішення не може вважатися задовільною, якщо вона призводить до зниження ККД системи.

Завдання досліджень. Розроблення загального підходу до проблеми оптимізації режимів роботи газопроводів з урахуванням ККД газоперекачувальних агрегатів і лінійних ділянок.

Виклад основного матеріалу. На вказаних принципах базується розроблена нами ме-

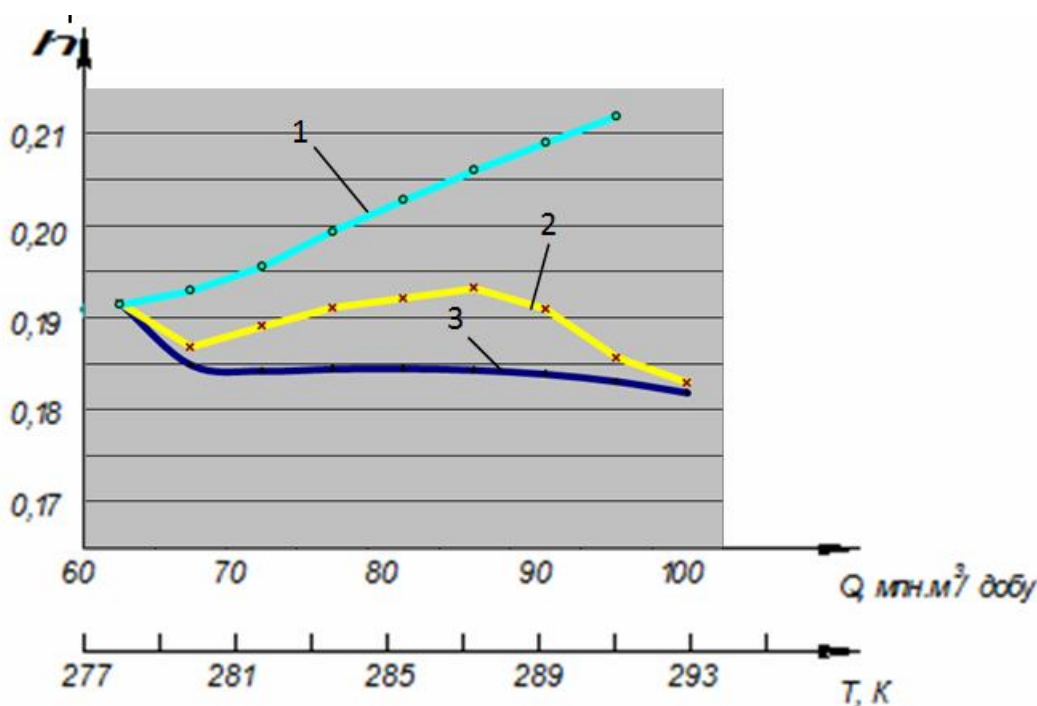


Рисунок 1 – Залежність ККД газопроводу від кінцевої температури газу (1) та від витрати газу при ККД ГПА 60% (2), при ККД ГПА 28,8% (3)

тодика розрахунку ККД газотранспортної системи [4].

Для апробації запропонованої методики розрахунку ККД газопроводу, оцінки його величини та аналізу залежностей від параметрів режиму перекачування виконано розрахунки для гіпотетичного газопроводу, яким 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 для різних умов роботи газопроводу. За результатами розрахунку побудовано графічні залежності, які подано на рис. 1.

Як видно з графіків, збільшення витрати газу по газопроводу призводить до зменшення ККД газотранспортної системи. Цей висновок, на перший погляд, парадоксальний, адже, відповідно до розрахункових залежностей зі збільшенням витрати величина ККД повинна зростати. Крім того, при збільшенні витрати (за інших ідентичних умов) зростатиме перепад тисків на початку і в кінці лінійної ділянки, що також повинно призвести до зростання ККД. Однак, величина витрати паливного газу зростає стрімкіше, що зрештою викликає зниження ККД. Таке співвідношення між витратою газу по газопроводу і витратою паливного газу спостерігається через низьке значення ККД газотурбінних установок, тобто внаслідок малоефективного використання енергії паливного газу. Якщо умовно припустити, що ККД ГТУ збільшився з 28,8% до 60%, то крива залежності ККД газопроводу від витрати газу матиме максимум, який у разі подальшого збільшення ККД ГТУ буде зміщуватися в сторону вищих значень витрати газу по газопроводу.

При русі газового потоку в трубопроводі потенціальна енергія тиску перетворюється на кінетичну енергію, яка завдяки роботі сил тертя, в свою чергу, перетворюється у внутрішню енергію, дисипація котрої в навколишнє середовище спостерігається у вигляді теплового потоку. Отже, величина теплового потоку від газу в докілья визначає міру розсіювання внутрішньої енергії газу і повинна впливати на ККД газопроводу. В наведеному прикладі експлуатації гіпотетичного газопроводу зміна теплового потоку в докілья може моделюватися зміною температури газу в кінці газопроводу: чим більша кінцева температура газу, тим менший тепловий потік в навколишнє середовище. Як видно з графіка, зростання кінцевої температури газу призводить до збільшення ККД газопроводу, що відповідає уявленням про збереження і перетворення енергії газового потоку.

Якщо припустити (як це загальноприйнято при енергетичному аналізі технічних систем), що загальний ККД газопроводу η може бути представлений у вигляді добутку послідовно з'єднаних ланок ГТУ-нагнітач-лінійна ділянка, то можна розрахувати ККД окремої лінійної ділянки, знаючи ККД нагнітача і ГТУ.

Якщо прийняти в рамках аналізу роботи гіпотетичного газопроводу величину ККД ГТУ рівним 0,288, величину ККД відцентрового нагнітача рівній величині його політропічного ККД, який визначався в процесі розрахунків, і числове значення котрого лежить у межах 0,76-0,81, то отримаємо діапазон зміни ККД лінійної ділянки газопроводу 0,98-0,92. Зауважимо, що відношення величини втрат внутрішньої енергії з тепловим потоком у докілья до

загальної енергії, підведеної до газового потоку, лежить саме в такому діапазоні.

На сьогодні роль наріжного каменю управління 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'язання 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 . Визначником газотранспортної роботи $Q \cdot L$ ($\text{м}^3 \cdot \text{км}$) за певний період є аналогічним вимірником 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 $Q \cdot L$ як універсальний вимірник "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 товаротранспортна робота розраховується за формулою

$$A = c (P_1^2 - P_2^2) \cdot Q,$$

в якій c – константа, яка розраховується за параметрами лінійної ділянки і включає її ККД;

P_1, P_2 – тиски на початку і в кінці ділянки;

Q – продуктивність газопроводу.

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

$$R = C_0 z_H T_H Q \left(\varepsilon - \frac{1}{\varepsilon} \right),$$

де C_0 – константа;

ε – ступінь стискування газу;

z_H і T_H – коефіцієнт стискуваності і температура газу на вході компресорної станції;

Q – продуктивність КС.

Оскільки непроективні режими експлуатації магістральних газопроводів в ринкових умовах не є винятковими і їх ефективність має оцінюватись за економічними критеріями прибутковості, то проблема формування ринково-орієнтованого вимірника продукції газотранспортного виробництва постає надзвичайно гостро. Ринково-орієнтований підхід до її розв'язання пролягає через удосконалення і унормування методичної бази розрахунків непроективних режимів роботи магістральних газопроводів. Непроективно орієнтовані методи розрахунків виконуваної газотранспортної 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 надактуальних 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 площину, слід керуватись 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 [5]

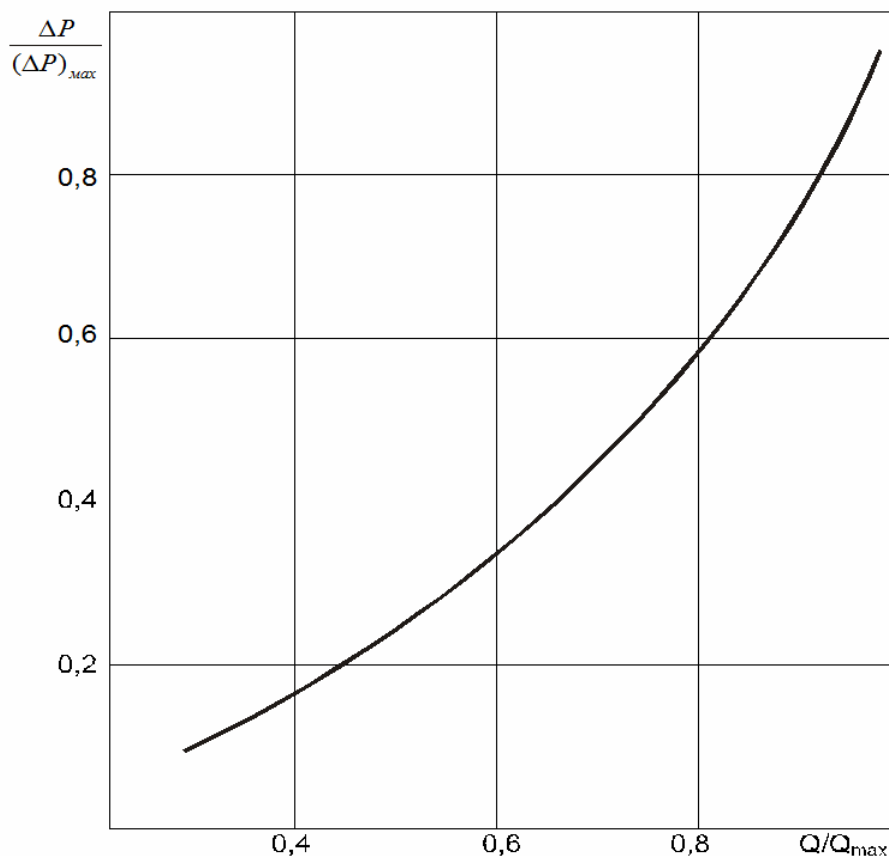


Рисунок 2 – Графічна модель залежності витрат енергії тиску газу $\Delta P = P_{поч} - P_k$ від продуктивності Q лінійної ділянки Борова – Першотравнева

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

де $O\Phi$ – витрати, що є незалежними від завантаження газотранспортної системи (витрати на обслуговування основних виробничих фондів $O\Phi$),

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 $Pr = f(O\Phi, N)$.

За результатами розрахунків нижче наведено графічну модель залежності $\Delta P = f(Q)$ для лінійної ділянки Борова – Першотравнева газопроводу «Союз». Аналіз одержаних результатів дає підстави стверджувати, що залежність витрат в лінійних ділянках енергії тиску газу ΔP від обсягів транспортованого газу Q є нелінійною. Специфічність нелінійної характеристики $\Delta P = f(Q)$ проявляється в тому, що вона є увігнутою 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 ΔP .

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 $0 - Q_{max}$. У 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 [6].

З метою порівняльного аналізу індивідуальних властивостей виробничих функцій КС проведені кількісні розрахунки залежності $N = f(Q)$ компресорної станції Машівка газопроводу «Союз».

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.

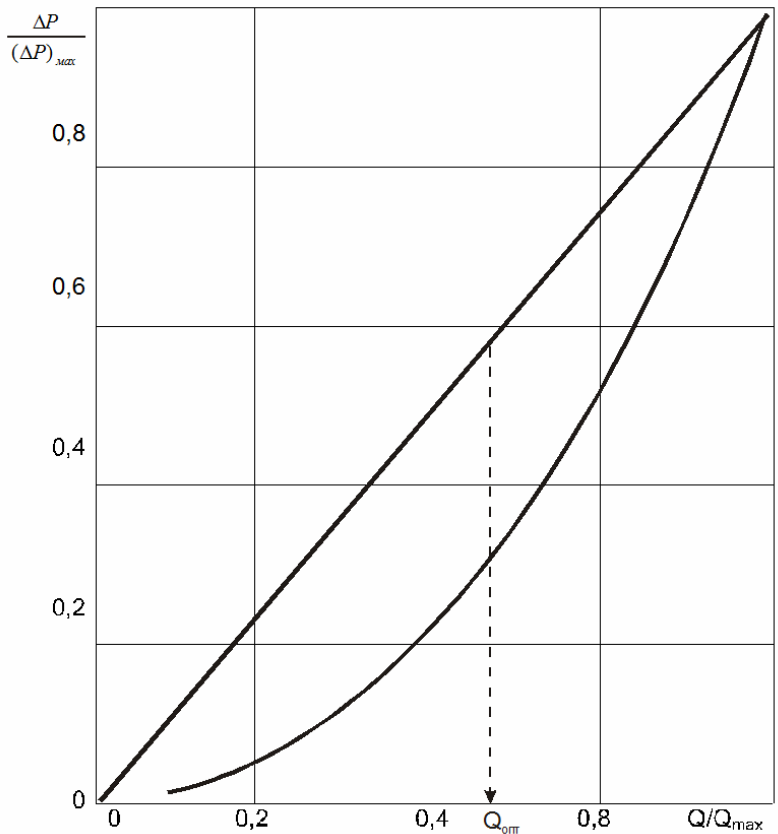
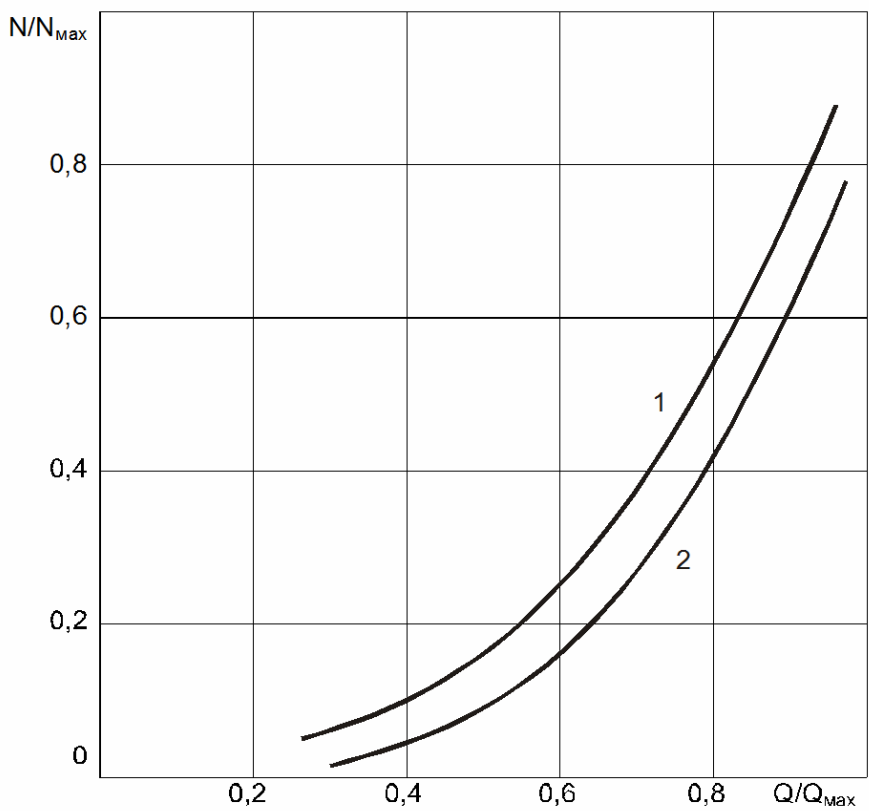


Рисунок 3 – Оптимальний режим роботи лінійної ділянки Борова – Першотравнева за показником $(\text{Над} - \Delta P) \rightarrow \max$



1 – ККД=0,25; 2 – ККД=0,30

Рисунок 4 – Порівняльні графіки виробничих функцій Машівка КС за різних значень ККД

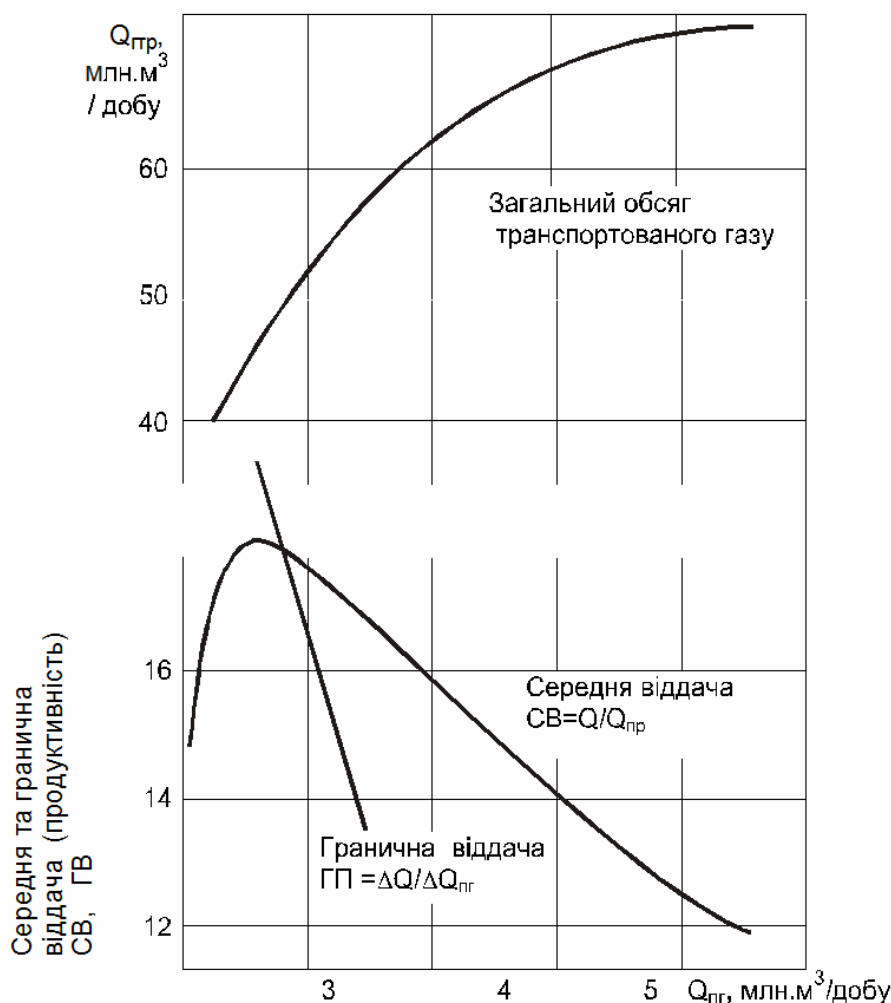


Рисунок 5 – Залежність між загальним обсягом транспортованого газу $Q_{гр}$, витратами паливного газу $Q_{пг}$ та середньою СВ і граничною віддачею ГВ магістрального газопроводу "Союз"

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 виробленої продукції (виконуваної газотранспортної роботи) за підвищення 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" [5].

Логічне пояснення цього закону стосовно магістральних газопроводів впливає з сутності фізики газотермодинамічних процесів транспортування газу, а саме: витрати енергії на подо-

лання опору тертя зростають нелінійно в залежності 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".

Другою характеристикою ефективності функціонування газопроводів є показник граничної віддачі від використання керованих енергетичних ресурсів. Цей показник є похідним від показника середньої віддачі СВ.

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

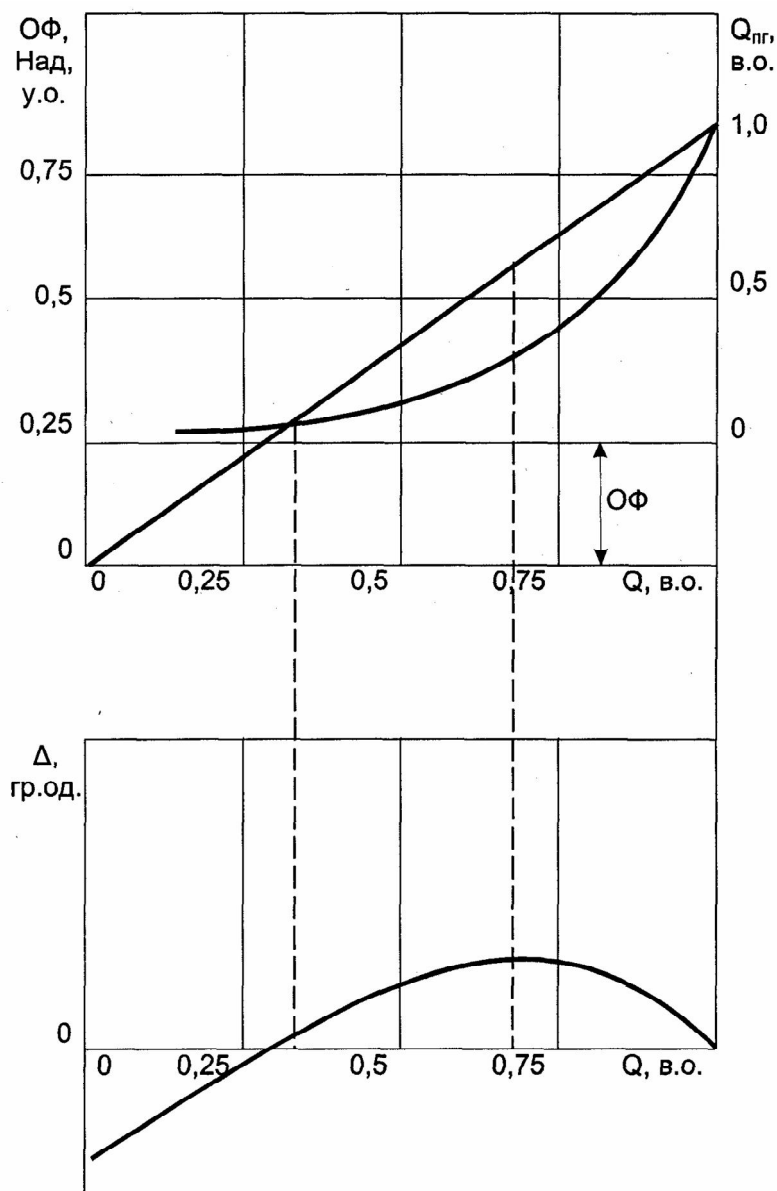


Рисунок 6 – Ефективність трубопровідного транспорту газу для газопроводу «Союз»

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 саме в тій точці, де остання досягає свого максимуму [7].

Показник граничної віддачі витрат енерго-ресурсів 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 ефективне 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.

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 ОФ та енергетичних ресурсів $N_{кв}$ 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 $Q_{\text{опт}} < Q_{\max}$, (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 глибинного аналізу сутності ринково-орієнтованого методу аналізу і підвищення ефективності трубопровідного транспорту газу.

Висновки

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

1. Оцінюємо надходження за командною і ринковою схемами.

2. Оцінюємо вартість перекачування одиниці транспортованого газу.

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

В точці, де загальні витрати мінімальні, уточнюємо вартість одиниці виконуваної газотранспортної роботи.

5. Отже, в будь-якій точці оптимізаційної області можна знайти надходження за ринковою схемою та за командною (витратною) схемою

6. Різниця між надходженнями за ринковою $H_{\text{гр}}$ і витратною H_Q схемами є прибуток Пр , визначений як різниця між повною виручкою і всіма витратами

8. Якщо витрати на обслуговування основних фондів ОФ надмірні і такі, що $Q_{\text{опт}} = Q_{\max}$, отже, $N_{\text{кв опт}} = N_{\text{кв макс}}$, то прибуток $\text{Пр} = H_{\text{гр}} - H_Q$ буде нульовим, тобто, газотранспортне виробництво за ринковими орієнтирами буде економічно збитковим.

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

Література

1 Поршаков Б.П. Повышение эффективности эксплуатации энергопривода компрессорных станций / Б.П. Поршаков, А.С. Лопатин, А.М. Назарьина. – М.: Недра, 1992. – 207 с.

2 Галиуллин З.Т. Технико-экономический анализ эффективности газотурбинного привода в транспорте природного газа / З.Т. Галиуллин, Е.В. Леонтьев, В.А. Щуровский // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1987. – С. 139-144.

3 Динков В.А. Повышен эффективности использования газа на компрессорных станциях / В.А. Динков, А.И. Гриценко, Ю.Н. Васильев. – М.: Недра, 1981. – 295 с.

4 Грудз В.Я. Эффективность использования энергоресурсов при трубопроводном транспорте газа / В.Я. Грудз, Я.В. Грудз, А.В. Дацюк // Нафтогазова енергетика. – 2008. – № 1 (6). – С. 52–54.

5 Баканов М.И. Теория экономического анализа / М.И. Баканов, А.Д. Шеремет. – М.: Финансы и статистика, 1993. – 288 с.

6 Жидкова М.О. Формування системи розрахункових моделей для оцінювання ефективності функціонування лінійних ділянок магістральних газопроводів / М.О. Жидкова, А.А. Руднік // Экология и ресурсосбережение. – 2001. – № 6. – С. 66 – 69.

7 Руднік А.А. Методика узагальненого оцінювання та підвищення ефективності функціонування систем трубопровідного транспорту газу / А.А. Руднік // Нафтова і газова промисловість. – 2000. – № 6. – С. 36 – 38.

Стаття надійшла до редакційної колегії
09.10.12

Рекомендована до друку професором
Д. Ф. Тимківим