

Н. Притула<sup>1,2</sup>, М. Притула<sup>1,2</sup>, В. Ямнич<sup>2</sup>, А. Дацюк<sup>3</sup>, С. Гладун<sup>3</sup>, О.Химко<sup>4</sup>  
<sup>1</sup>Центр математичного моделювання ІППММ ім. Я.С. Підстригача НАН України,  
<sup>2</sup>ТЗОВ "Математичний центр",  
<sup>3</sup>Об'єднане диспетчерське управління ДК „Укртрансгаз”,  
<sup>4</sup>Національний університет "Львівська політехніка"

## ПАЛИВНО – ЕНЕРГЕТИЧНІ ЗАТРАТИ НА ТРАНСПОРТУВАННЯ ГАЗУ

© Притула Н., Притула М., Ямнич В., Дацюк А., Гладун С., Химко О., 2011

Досліджено вплив витрати газу на енергетичні затрати його транспортування. Для цього проведено числові експерименти на реальних даних з попереднім уточненням параметрів моделей газових потоків у трубопроводах магістральних газопроводів та цехах компресорних станцій. Проаналізовано вплив усереднення основних параметрів моделі руху газу на точність термо-, гідравлічних розрахунків.

**Ключові слова:** магістральний газопровід, компресорна станція, енергетичні затрати, оптимальний режим.

**The impact of gas consumption on energy costs of it's transportation is researched in this paper. For this a numerical experiments on real data with previous introducing clarity into parameters of gas flow models in pipelines of trunk gas pipeline and compressed air plant shop are run. The influence of averaging of gas flow model key parameters on its accuracy is analyzed. It is made for ensuring the precision of thermohydraulic calculations.**

**Key words:** trunk gas pipeline, compressed air plant, energy costs, optimal conditions.

### Вступ

Процес транспортування газу супроводжується постійними змінами параметрів газу, зовнішніх факторів, які впливають на об'єми споживання газу, параметри газових потоків в об'єктах транспортування, розподілу та зберігання газу. Велика розмірність системи, часткове метрологічне та інформаційне забезпечення істотно впливають на складність формування параметрів керування такою системою. Для побудови швидких алгоритмів формування параметрів керування газопотоками потрібно спершу визначити область існування оптимального розв'язку.

Витрата газу є основним фактором впливу на режим транспортування газу (істотно впливає на завантаження компресорних станцій, а отже, і на величину витрати паливно-енергетичних ресурсів).

При формуванні собівартості транспортування газу визначальними є вартість паливно-енергетичних ресурсів, ціна на які постійно зростає, та ККД газоперекачувальних агрегатів, який наразі є достатньо низьким.

Більшість методів оптимізації режимів транспортування газу є перебірними. Для зменшення складності алгоритмів оптимізації потрібно визначити області оптимальності зміни режимних параметрів, пов'язаних з величиною об'ємів транспортування газу.

### Вплив усереднення параметрів на точність розрахунку розподілу тиску на ділянках магістральних газопроводів

Для отримання інженерних формул розрахунку параметрів стаціонарного розподілу тиску газу в магістральному газопроводі зроблено певні припущення. Рівняння стаціонарного руху газу, використавши термічне рівняння стану газу, подамо у вигляді

$$\begin{cases} \frac{dP}{dx} + \frac{d(arn^2)}{dx} + 1 \frac{r}{2} \frac{v^2}{D_f} + g r \frac{dh}{dx} = 0 \\ \frac{d}{dx} \left[ rv \left( E + \frac{P}{r} \right) \right] - \frac{4K(T_{gr} - T)}{D_i} + rv g \frac{dh}{dx} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Тут  $v$  — швидкість руху газу;  $D_f$  — внутрішній діаметр трубопроводу;  $K$  — коефіцієнт теплопередачі від трубопроводу до ґрунту;  $h$  — висота залягання трубопроводу;  $E$  — повна енергія одиниці маси газу;  $\lambda$  — коефіцієнт гідравлічного опору;  $\alpha$  — коефіцієнт Коріоліса;  $T_{gr}$  — температура ґрунту;  $g$  — прискорення вільного падіння;  $x$  — біжуча координата  $x \in [0, l]$ ,  $l$  — довжина трубопроводу;  $D_i$  — коефіцієнт Джоуля–Томсона.

Бачимо, що для ділянки трубопроводу у стаціонарному випадку термодинамічний стан газу визначається значеннями тиску  $P$  та температури  $T$ .

Зазначимо, що коефіцієнт гідравлічного опору  $\lambda$  залежить від коефіцієнта шорсткості внутрішньої стінки трубопроводу  $K_s$ , внутрішнього діаметра трубопроводу  $D_f$  та числа Рейнольдса, тобто  $I = I(\text{Re}, D_f, K_s)$ .

Окремо проінтегрувавши рівняння системи (1) (перше за умови сталості параметрів  $I, z, T$  (взьмемо середні значення на ділянці газопроводу)), отримаємо:

$$P_i^2 e^{-bc} - P^2(x) = -\bar{I} \frac{gRT}{D_f} \left( \frac{M}{S} \right)^2 x \frac{1 - e^{-bc}}{b}, \quad (2)$$

$$T(x) = T_{gr} - [T_i - T_{gr}] e^{-g} + \bar{D}_i \frac{P_i^2 - P^2(x)}{2gP} (1 - e^{-g}) + \frac{g\Delta h}{\bar{c}_p g} (1 - e^{-g}), \quad (3)$$

де  $M$  — масова витрата газу ( $M = \rho v S$ ),  $S$  — площа поперечного перерізу трубопроводу,  $\bar{D}_i$  — середнє вздовж ділянки значення коефіцієнта Джоуля–Томсона;  $\bar{c}_p$  — усереднене значення ізобарної теплоємності,  $g = p K D_f l / r_c q_{ij} \bar{c}_p$  — коефіцієнт Шухова,  $\rho_c$  — густина газу у стандартних умовах,  $\Delta h$  — різниця висотних відміток початку та кінця трубопроводу,  $b = 2g\Delta h / (zRT)$  — коефіцієнт. Тут  $i$  надалі риска над відповідним параметром означає його середнє значення. Останній доданок у формулі (2.3) враховує вплив сил тертя на розподіл температури вздовж трубопроводу. Параметр  $c = 1 + \frac{Da}{Ix} \ln \frac{2g\Delta h D_f + I x^2(x)}{2g\Delta h D_f + I x_i^2}$ , який входить до формули (2), враховує

вплив зміни лінійної швидкості на цій ділянці трубопроводу.

Із співвідношення (3) отримуємо середню температуру газу в похилому газопроводі

$$\bar{T} = T_{gr} + [T_i - T_{gr}] \frac{1 - e^{-g}}{g} - \bar{D}_i \frac{P_i^2 - P_j^2}{2gP} \left( 1 - \frac{1 - e^{-g}}{g} \right) - \frac{g\Delta h}{\bar{c}_p g} \left( 1 - \frac{1 - e^{-g}}{g} \right). \quad (4)$$

Принциповими спрощеннями є усереднення параметрів  $I, z, T, \bar{D}_i, \bar{c}_p, K, T_{gr}$  та припущення рівності швидкостей руху газу на кінцях ділянки газопроводу. Останнє припущення вносить похибку в третій – четвертий значущий знак для тиску на горизонтальних газопроводах. Для похилих газопроводів цей вплив може бути дещо більшим.

Наведемо розрахунки впливу усереднення основних параметрів  $I, z, T$  на розрахунок тиску на виході ділянки газопроводу. Для цього було проведено числові експерименти на ділянці газопроводу завдовжки 120 км з внутрішнім діаметром 1400 мм та різною витратою газу. Розрахунок проводився: для всієї ділянки газопроводу; по частинах ділянки (ділянку було розбито на різну кількість частин); за формулами (2)-(4) та методом Рунне–Кутта прямим розв'язуванням системи (1). Розбіжності між результатами розрахунків були в межах точності даних при витраті газу до 80 млн. м<sup>3</sup> за добу. При більших об'ємах транспортування газу різниця в розрахунках досягала і 0.5 атм.

### **Дослідження впливу витрати газу на магістральному газопроводі на паливно-енергетичні затрати**

Між витратою газу та мінімальними паливно-енергетичними затратами на транспортування газу існує нелінійна залежність. Її варто встановити для всіх газопроводів окремо. Це дасть

можливість швидко оцінювати ефективність роботи компресорних цехів та компресорних станцій в реальних умовах. Для проведення вказаних досліджень розглянуто частину реального газопроводу. Перед початком проведення числових експериментів зроблено ідентифікацію параметрів моделей газових потоків у трубопроводах та компресорних станціях. Всі результати отримані за певних умов, наведених нижче. Величина витрати паливного газу пов'язана з тисками газу на початку та у кінці газопроводу, з режимами роботи КС та сумарним об'ємом акумульованого газу в газопроводі. Існує значний потенціал оптимізації, якщо є можливість змінювати об'єм акумульованого газу в газопроводі. Цей висновок підтверджений проведеними числовими експериментами.

Таблиця 1

Об'єми (млн. м3/добу)	КС Первомайськ			КС Машівка			КС Кременчук		
	Q паливне	Вх. тиск	Вих. тиск	Q паливне	Вх. тиск	Вих. тиск	Q паливне	Вх. тиск	Вих. тиск
37	0	67.1		0	64.3		0	61.3	
50	0	65.1		0	59.9		0	53.9	
60	0	63.1		0.20045	55.3	71	0	63.8	
70	0	60.7		0.31558	49.3	73	0	63.3	
80	0.31579	57.8	74	0	62		0.48801	46.2	73
90	0.35286	54.4	71	0.30707	54.6	73	0.33459	56.4	73
100	0.52345	50.2	72	0.39452	51.5	73	0.46659	51.8	73

Об'єми (млн. м3/добу)	КС Олександрівка			КС Тальне			Сумарне Q паливне
	Q паливне	Вх. тиск	Вих. тиск	Q паливне	Вх. тиск	Вих. тиск	
37	0	57.6		0	53.6		0
50	0.21649	46.5	62.5	0	56.1		0.21649
60	0.19156	54.9	66.7	0	58.3		0.39201
70	0.31757	51	71.4	0	60.8		0.63315
80	0	59.3		0.44519	42.2	63.5	1.24899
90	0.33905	55.4	73	0.26296	56	66.2	1.59653
100	0.46787	50.6	73	0.42041	51.5	69.5	2.27284

Об'єми (млн. м3/добу)	К—сть працюючих КС	Вартість паливного газу	Дохід за транзит газу
37	0	0	5478420.096
50	1	671119	7403270.4
60	2	1215231	8883924.48
70	2	1962765	10364578.56
80	3	3871869	11845232.64
90	5	4949243	13325886.72
100	5	7045804	14806540.8

У табл.1 відсутність числа у графі “Вих. тиск” означає, що вхідний і вихідний тиски однакові.

### Оцінка оптимальних об'ємів транспортування газу

Для отримання попередніх оцінок економічної ефективності об'ємів транспортування газу використано залежність витрати паливного газу від витрати транспортованого газу, вартість використаного паливного газу на транспорт, ставка на транзит газу та задані початкові дані для проведення для розрахунку.

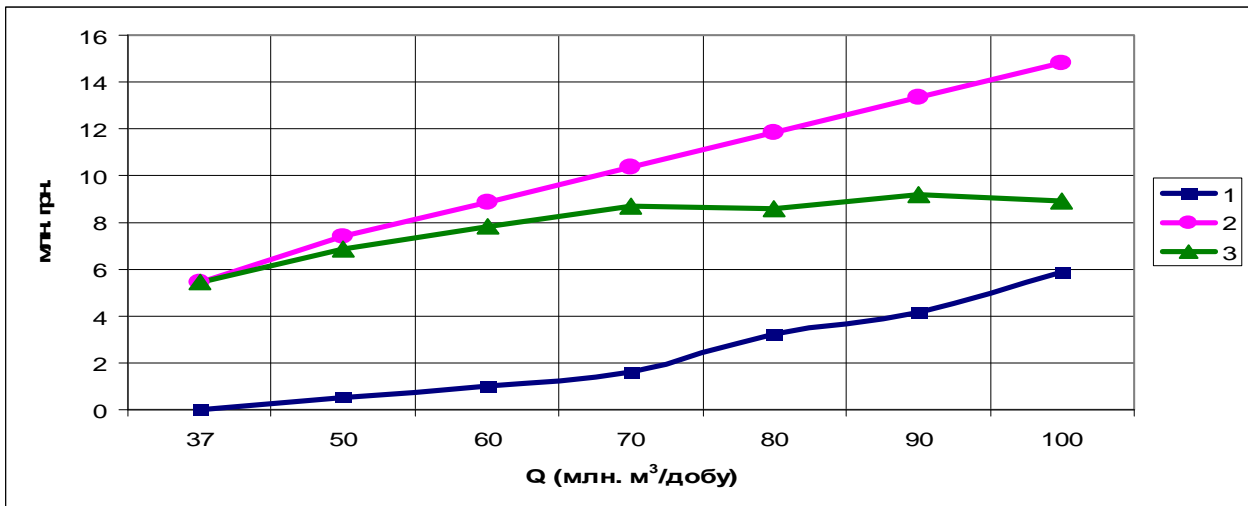


Рис. 1. Графіки залежності вартості паливного газу (2600 грн./1000 м<sup>3</sup>) (грошові затрати на транспорт див. 1), транзиту (зароблені гроші див. 2) та різниці між 2-м та 1-м графіками (умовно назвемо прибутком) та продуктивністю газопроводу

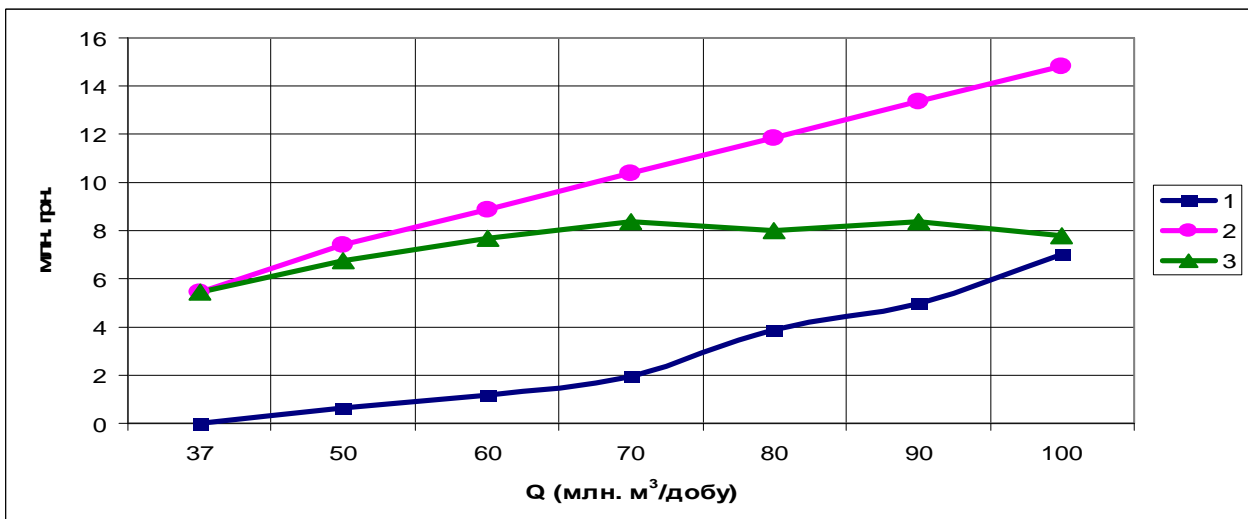


Рис. 2. Графіки залежності вартості паливного газу (3100 грн./1000 м<sup>3</sup>) (грошові затрати на транспорт див. 1), транзиту (зароблені гроші див. 2) та різниці між 2-гим та 1-шим графіками (умовно назвемо прибутком) та продуктивністю газопроводу

Дані для розрахунку:

- ціна за 1000 м<sup>3</sup> паливного газу рівна 2600 грн. (рис.1) – 3100 грн.(рис.2);
- ціна за транспортування 1000 м<sup>2</sup> газу на 100 км = 2.7\$ (курс долара = 8 грн. за 1\$);
- вхідний тиск (вихід КС "Борова-1") = 70 атн.;
- вихідний тиск (вихід КС "Гайсин") = 50 атн.;
- температура на вході (вихід КС "Борова-1") = 40 °С;
- загальна довжина розглянутого газопроводу 685 488 км.

Результати, отримані в процесі проведення числових експериментів, показують:

- економічно не вигідно транспортувати газ за існуючої витратної ставки у разі витрати, більшої, ніж 70 млн. м<sup>3</sup>/добу (для труби з внутрішнім діаметром 1400 мм);
- для транспортування 90 млн. м<sup>3</sup>/добу економічно доцільною є ставка > 4,1\$ за 1000 м<sup>3</sup> газу на 100 км (без врахування багатьох інших затрат, зокрема амортизаційних відрахувань).

Таблиця 2

## Дослідження режимів роботи газопроводу на предмет їх оптимальності

КС Первомайськ		КС Машівка		КС Кременчук		КС Олександрівка		КС Тальне	
Заміряний	Оптимізований	Заміряний	Оптимізований	Заміряний	Оптимізований	Заміряний	Оптимізований	Заміряний	Оптимізований
0.14138	0	0	0.16704	0.36201	0	0.41717	0.53822	0.36385	0.45787
0.14264	0	0	0.16975	0.17569	0	0	0	0.18417	0.25128
0.33675	0.35076	0.19569	0.20368	0.21996	0	0.23667	0.36156	0.23570	0.23570
0	0	0.19616	0.24231	0.17982	0	0.18781	0.23968	0.20168	0
0	0	0.18478	0.24536	0.31534	0	0.32412	0.38636	0.33527	0.33527

Продовження таблиці 2 по горизонталі

КС Гайсин		Сумарний заміряний	Сумарний оптимізований	Різниця	Процент економії, %	Дата
Заміряний	Оптимізований					
0.35374	0.36475	1.6382	1.5279	0.1103	7.17	27.05.09
0	0	0.5025	0.4210	0.0815	16.22	06.06.09
0.20494	0.20494	1.42971	1.35664	0.07307	5.11	03.07.09
0.17259	0.18450	0.93806	0.66649	0.27157	28.95	17.07.09
0.29425	0.29425	1.45376	1.26124	0.19252	13.24	22.09.09

Отримані результати (див. табл.2) є характерними для режимів, які спостерігалися на інтервалі часу 03.07.09 – 17.07.09.

Слід очікувати, що знайдений потенціал оптимізації існує і для інших інтервалів часу роботи газопроводу «Союз». Ефекту економії паливного газу досягнуто за умов: тиск входу на КС «Первомайськ» підтримується на рівні заміряного; тиск виходу на КС «Гайсин» підтримується на рівні заміряного; технологічні обмеження за тиском на всіх КС при розрахунках враховані; витрата газу на вході КС «Первомайськ» підтримується на рівні заміряної. Дії, які привели до економії паливного газу: відключення окремих ГПА, КС та зміна розподілу тисків на виходах окремих КС.

Отримані результати показують, що потенціал оптимізації завжди існує. Його використання можливе тільки за вчасного виявлення та швидкого оцінювання з достатньою точністю.

## Висновки

Проведені дослідження та розрахунки вказують на необхідність створення програмного модуля, який би дав змогу оцінювати ефективність роботи магістральних газопроводів та газотранспортної системи загалом з різною завантаженістю. Наведені результати можна використати для формування економічно обґрунтованих ставок транзиту газу, мінімізації використання паливного газу.

1. Панкратов В.С. Автоматизированная система диспетчерського управління ГТС/ В.С. Панкратов, А.С. Вербило. – М.: Изд-во ООО "ИРЦ Газпром", 2002. –98 с.
2. Сарданашивили С. А. Расчетные методы и алгоритмы / С. А. Сарданашивили. – М.: Нефть и газ, 2005. – 577 с.
3. Притула Н. М. Розрахунок параметрів потокорозподілу газу в газотранспортній системі (стаціонарний випадок). Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. – 2007. – Вип. 5. – С. 146–155.
4. Притула Н.М. Задачі оптимізації потокорозподілу в газотранспортних системах // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка": Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – Львів, 2007. – № 604. – С. 220–227.