

Дослідження режимів роботи складної системи газопроводів у разі її недовантаження

© **В.Б. Михалків**
канд. техн. наук
ІФНТУНГ

УДК 622.692.4

На сьогодні недовантаження газотранспортної системи України становить 42,4 % і продовжує зростати. Процес падіння продуктивності газопроводу суттєво впливає на режими його роботи: зменшуються тиск і температура газу, проходить перерозподіл потоків газу в системі газопроводів, змінюється кількість працюючих газоперекачувальних агрегатів та компресорних станцій. Це призводить до нестаціонарності в роботі газотранспортної системи. Отже, виникає необхідність у дослідженні режимів роботи газотранспортної системи в період її недовантаження. За об'єкт досліджень вибрано західну ділянку газотранспортної системи України, через яку проходить 65 % газу, призначеного для експорту.

Ключові слова: газопровід, система, течія, нестаціонарність, математична модель.

В настоящее время недогрузка газотранспортной системы Украины составляет 42,4 % и продолжает увеличиваться. Процесс падения производительности газопровода существенно влияет на режимы его работы: уменьшаются давление и температура газа, проходит перераспределение потоков газа в системе газопроводов, изменяется количество работающих газоперекачивающих агрегатов и компрессорных станций. Это приводит к нестационарности в работе газотранспортной системы. Итак, возникает необходимость в исследовании режимов работы газотранспортной системы в период недогрузки. В качестве объекта исследований выбрано западный участок газотранспортной системы Украины, через которую проходит 65 % газа, предназначенного для экспорта.

Ключевые слова: газопровод, система, течение, нестационарность, математическая модель.

Currently, undercapacity of gas transportation system of Ukraine makes 42,4 % and continues to grow. Loss of pipeline performance significantly changes modes of its operation: changing the pressure and temperature of the gas, causing reallocation of gas flows in the pipelines system, changing the number of operating gas compressor units and compressor stations. These changes cause unsteady operation in the transmission system. Therefore, there is a need to study the modes of operation of the gas transportation system at the time of its undercapacity. Western section of the gas transportation system of Ukraine, through which transports 65% of the gas intended for export, was selected as the object of study.

Key words: pipeline system current, non-stationary, the mathematical model.

Газотранспортна система (ГТС) України – одна з найбільших у світі. Вона виконує дві основні функції: забезпечення природним газом внутрішніх споживачів, а також транзит природного газу через територію України до Західної та Центральної Європи. Газотранспортна система України має протяжність понад 36 тис. км. До її складу входять газопроводи діаметром до 1400 мм, міжниткові перемички, компресорні станції з різними типами приводів, запірні арматури тощо. Протяжність газопроводів діаметром понад 1020 мм становить 14 тис. км. Пропускна здатність газотранспортної системи на вході 288 млрд м³ на рік, а на виході 178,5 млрд м³ на рік, у тому числі у країні Європи 142,5 млрд м³ на рік. Проте якщо 2011 р. транзит газу територією України становив 104,2 млрд м³, що було нижче запланованого, то за 2013 р. до країн Європи він сягав лише 83,7 млрд м³, або 58,7 %. Тенденція зменшення транзиту газу територією України продовжилася й у 2014 р., об'єм транзиту газу скоротився ще на 27,8 % –

до 62,2 млрд м³ на рік, що становить 42,4 % від максимального завантаження. За квітень 2015 р. транзит газу становив 5,2 млрд м³. Отже, можна зробити висновок, що газотранспортна система України працює зі значним недовантаженням [1].

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень із питань розрахунку режимів роботи газопроводів

Під час аналізу та планування функціонування ГТС виникає завдання розрахунку режиму. Якщо газопровід представити у вигляді послідовності лінійних ділянок (ЛД) і компресорних станцій (КС), то завдання зводиться до послідовного розрахунку режимів цих технологічних об'єктів. Необхідність багаторазового розрахунку ЛД і КС виникає також для вирішення завдань оптимізації транспортування газу [2, 3]. Таким чином, газодинамічний розрахунок ЛД і КС є базовим практично для всіх видів режимно-технологічних роз-

рахунків, необхідність у яких виникає під час аналізу та планування режимів і розвитку ГТС. Удосконалення методів розрахунку цих технологічних об'єктів допоможе підвищити ефективність вирішення широкого кола завдань управління ГТС. Гідрравлічний розрахунок інженерної мережі потребує розв'язання системи нелінійних рівнянь великої розмірності, а необхідність теплового розрахунку призводить до організації зовнішньої ітераційної процедури ув'язки температур, у зв'язку з чим весь розрахунковий цикл потребує значних витрат машинного часу, тому такий підхід може бути рекомендований лише для мереж надзвичайно складної структури. Однак на практиці, як правило, реалізується обмежений набір типів конфігурацій, що призвело до виникнення низки специфічних методів розрахунку ЛД. Метод «еквівалентування», наприклад, передбачає подання ЛД у вигляді послідовності елементарних ділянок (ЕД), кожна з яких має кілька паралельних простих газопроводів, причому відбори (притоки) газу зосереджені на кордонах ЕД. Кожна ЕД за певними правилами замінюється «еквівалентним» простим газопроводом, і розрахунок ЛД зводиться до послідовного їх розрахунку. Існують загальні моделі розрахунку мереж із активними елементами, які можуть бути використані і для розрахунку КС. Оскільки використання загальних «мережевих» методів для розрахунку КС призводить до великих витрат машинного часу, вони не набули значного поширення. Також існують алгоритми, засновані на ітераційній процедурі ув'язки, але схожимість цих методів досить низька. Подальші дослідження щодо ефективних методів розрахунку ГТС привели до створення універсальної методики, що отримала назву «автоматизованої імітаційної моделі» [2]. Проте всі методи засновані на розв'язанні громіздких систем диференціальних рівнянь і не враховують завантаження газопроводу і перебігу газодинамічних процесів.

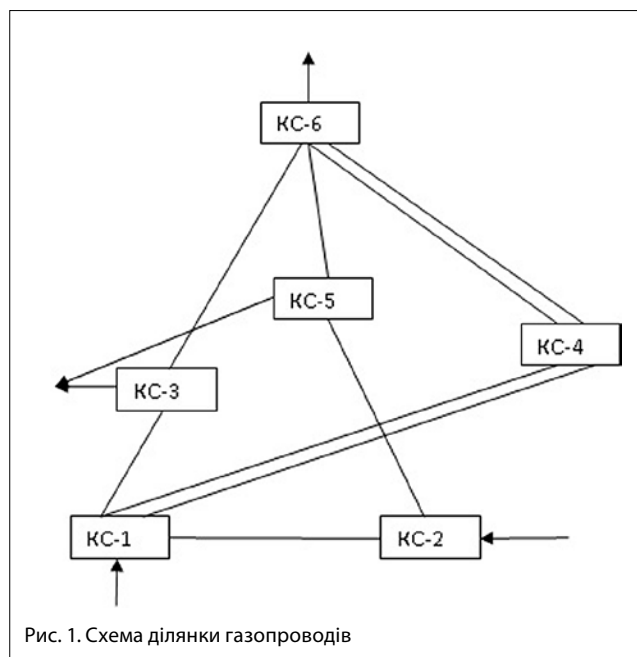
Дослідження перебігу нестационарних процесів для різного завантаження газопроводу

Для проведення досліджень вибрано західну частину газотранспортної системи, яка цілком відповідає конфігурації загальної системи. Загальна проектна продуктивність обраної ділянки ГТС становить 111 млрд м³ на рік [4]. Схему ділянки подано на рис. 1.

На ділянці можливе вимірювання технологічних параметрів на вході і виході кожної КС, а також параметри на вході і виході. Для вимірювання використовували штатні прилади газотранспортних підприємств. Основними параметрами, які вимірювали, прийнято тиск та витрату газу.

Компримування газу на компресорних станціях здійснюється відцентровими нагнітачами з приводом від газових турбін та електродвигунів. Необхідно зауважити, що електропривід має можливість регулювання обертів.

За характером протікання газотермодинамічних процесів у газопроводах їх можна поділити на стаціонарні, нестационарні і квазістаціонарні. Оскільки внаслідок турбулентності руху газу в потоці спостерігають-



ся пульсації параметрів у часі, то з фізичної точки зору чисто стаціонарні процеси в газопроводах неможливі, мова може йти лише про квазістаціонарні процеси, математичний опис яких із певним ступенем вірогідності може бути здійснений на основі моделей стаціонарного руху газу.

Найбільш складно моделювати неізотермічні неусталені режими течії газу по трубопроводу.

Для опису функціонування складної газотранспортної системи передбачається використання агрегативного підходу до теорії складних систем [5]. Тому для кожного елемента мережі граничні умови при $x=0$ і $x=l$ потрібно задавати у вигляді рівнянь тиску та температури газу.

Для початкового та кінцевого елементів у мережі граничні умови відповідно при $X=0$, $X=L$ повинні задаватися у вигляді:

$$\text{при } X=0 \quad T = f_1[\tau, 0] \quad P = f_2[\tau, 0], \quad (1)$$

$$\text{при } X=L \quad M = f_3[\tau, L]. \quad (2)$$

Функції f_i , $i=1 \dots 3$ визначають за допомогою методів прогнозування станів зовнішнього середовища на основі експериментальних даних [1] і задають у вигляді полінома певного степеня, який вибирають за необхідної точності.

Нестационарні процеси в газопроводі із використанням ізотермічної і неізотермічної моделей перекачування порівнювали між собою за критерієм нестационарності режиму руху [1]:

$$N = \frac{H\tau}{L^2}, \quad H = \frac{2C^2 d}{\xi W}, \quad (3)$$

де τ – тривалість перехідного процесу; L – зведена довжина газопроводу; H – параметр режиму; C – швидкість поширення малих збурень у газі, $C^2 = kRT$; \bar{T} – середня температура газу початкового та кінцевого стаціонарних процесів, яка визначається як середнє арифметичне середніх стаціонарних температур цих процесів

$\bar{T}=0,5(T_1+T_2)$; T_1, T_2 – середні по довжині стаціонарні температури початкового та кінцевого стаціонарних процесів; $k=C_p/C_v$ – показник адіабати; ξ – інтегральний коефіцієнт гідравлічного опору газопроводу діаметром d ; W – середня середньоінтегральна лінійна швидкість газу для початкового та кінцевого стаціонарних процесів, визначена як середнє арифметичне середніх швидкостей W_1 і W_2 відповідно початкового та кінцевого стаціонарних процесів, $W=0,5(W_1+W_2)$.

Швидкості W_1 і W_2 визначили за середніх стаціонарних значень тисків і температур для кожного з процесів:

$$W_{1,2} = \frac{M_{1,2} P_0 T_{сеп1,2}}{FP_{сеп1,2} T_0 \rho_0}, \quad (4)$$

де F – площа перерізу трубопроводу; P_0, T_0 – стандартні умови; ρ_0 – густина газу в стандартних умовах; $M_{1,2}$ – масова витрата для початкового (кінцевого) стаціонарного процесу.

Для розрахунку неусталеного неізотермічного режиму транспортування газу по трубопроводних системах необхідно спочатку визначити початкові розподіли температур, тиску, густини і масової витрати, у зв'язку з чим потрібно розв'язати відповідну стаціонарну задачу на основі середньоінтегральних значень вказаних величин. Нестационарний процес перекачування газу по трубопроводу описується системою диференціальних рівнянь:

руху

$$F \frac{\partial P}{\partial x} + W \xi \frac{M}{2D} + \rho g F \frac{\partial z}{\partial x} = 0; \quad (5)$$

нерозривності

$$M = \rho W F; \quad (6)$$

енергії

$$W \frac{\partial T}{\partial x} \left(T_p \frac{\partial C_p}{\partial T} + \rho C_p \right) = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial \lambda}{\partial T} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial \lambda}{\partial P} \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{U \alpha_1}{F} (T_{ст} - T) + \rho g W \frac{dz}{dx}.$$

Окрім того, для стінки трубопроводу та ґрунту двомірні рівняння теплопровідності мають вигляд

$$\frac{\partial^2 T_{ст}}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{ст}}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_{ст}}{\partial r^2} = 0. \quad (7)$$

$$\frac{\partial^2 T_{гп}}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{гп}}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_{гп}}{\partial r^2} = 0. \quad (8)$$

Система (7)...(8) доповнюється такими граничними умовами:

- на межі $x=0$ (на початку трубопроводу) задають середньоінтегральні значення температури і тиску, за якими із рівняння стану знаходять значення густини газу;
- на межі $x=L$ (у кінці трубопроводу) задають середньоінтегральне значення масової витрати;
- на межі стінка–газ ($r=R$), стінка–ґрунт ($R_г=r$) задають такі ж граничні умови, як і для нестационарного випадку;

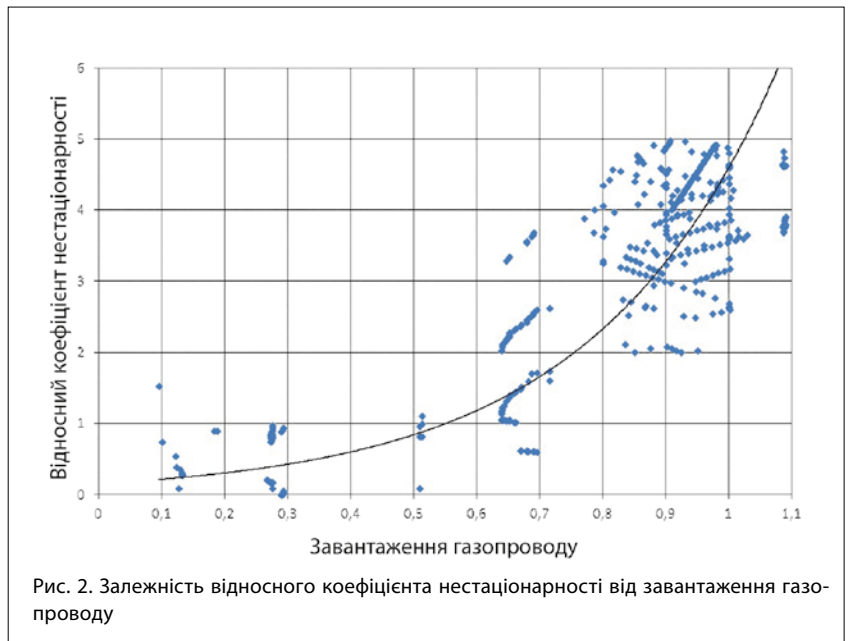


Рис. 2. Залежність відносного коефіцієнта нестационарності від завантаження газопроводу

- на межі $r=R_г+R_{гп}$ задають граничну умову, причому для стаціонарного випадку значення $T_{гп}^R$ виражається через невідому температуру стінки на межі стінка–ґрунт.

Вивчення перехідних процесів у газопроводах із пересіченим профілем траси здійснювали шляхом аналізу чисельних розв'язків математичної моделі газодинамічних процесів, які описуються системою рівнянь (11)–(13).

Розрахунки проводили за різних значень параметрів перекачування. Нестационарні процеси в газопроводі за різних об'ємів перекачування зіставлені між собою за критерієм нестационарності режиму руху [4].

Аналіз результатів показав, що граничну межу, при якій у моделі процесу необхідно проводити розрахунок із урахуванням нестационарності, можна задати критерієм нестационарності $N_{гп}=3,5$ [2]. Якщо для заданого процесу $N \leq N_{гп}$, то нестационарності процесу можна не враховувати.

Для досліджень вибирали дані з експлуатації системи газопроводів протягом 1986–2015 рр.. зі зміною ступеня завантаження системи газопроводів від 1,08 у 1988 р. до 0,1 січні у 2008 р., коли транзит газу територією України припинявся повністю. Результати досліджень подано на рис. 2.

Для наглядності введено поняття відносного коефіцієнта нестационарності $N_г=N/N_{гп}$. Тоді відносний граничний коефіцієнт нестационарності рівний 1. У нашому випадку граничному коефіцієнту нестационарності відповідає завантаження 0,55. Отже, у разі завантаження газопроводу менше 0,55 нестационарності течії газу можна не враховувати, що значно спрощує розрахунки режимів роботи.

Висновок

Під час проведення тривалого промислового експерименту на західній ділянці газотранспортної системи України встановлено взаємозв'язок між перебігом нестационарних процесів та завантаженням газопроводу. Зі зростанням завантаження нестационарності

нарність руху газу збільшується, причому залежність є ступеневою. Граничним завантаженням, при якому нестационарність руху газу можна не враховувати, є 0,55. Зі збільшенням завантаження вище граничного розрахунок режимів роботи газопроводу необхідно

вести з урахуванням нестационарності течії газу. Але за наявного ступеня завантаження системи газопроводів у 0,424 нестационарність течії газу можна не враховувати, що значно спрощує розрахунки режимів роботи.

Список використаних джерел

1. **Міністерство** енергетики та вугільної промисловості України. Статистична інформація [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://mpe.kmu.gov.ua/> (21.04.15). – Назва з екрану.
2. **Режими** газотранспортних систем / Є.І. Яковлев, О.С. Казак, В.Б. Михалків, Д.Ф. Тимків, В.Я. Грудз. – Львів: Світ, 1992. – 170 с.
3. **Трубопровідний** транспорт газу / М.П. Ковалко, В.Я. Грудз, В.Б. Михалків [та ін.]. – К.: АренаЕКО, 2002. – 600 с.
4. **Газотранспортна** система України [Електронний ресурс]. Режим доступу до ресурсу: http://uk.wikipedia.org/wiki/Газотранспортна_система_України (24.11.14). – Назва з екрану.
5. **Растрюгин Л.А.** Введение в идентификацию объектов управления / Л.А. Растрюгин, Н.Е. Маджаров. – М.: Энергия, 1977. – 216 с., ил.

Зростання потужностей зі зрідження газу в світі

За інформацією Національного банку Катару, зараз у світі в царині зрідження природного газу реалізується 16 великих проектів, що дасть можливість збільшити загальну річну потужність заводів зі зрідження газу на 12 млн т уже в 2016 р. і на 33 млн т у 2017 р. Найбільший внесок у нарощування потужностей зроблять Австралія та США. В Австралії в поточному столітті відкрито нові великі газові родовища, а тому галузь очікує на великі інвестиції. Тільки в проекти ЗПГ сумарною річною потужністю 60 млн т, які знаходяться на стадії будівництва, асигновано 180 млрд дол. США. У Сполучених Штатах Америки зараз будують заводи зі зрідження газу потужністю 50 млн т на рік, поштовхом до цього стала так звана сланцева революція, яка перетворює країну з імпортера природного газу в потенційного експортера. Отже, ряд заводів, запроектованих для регазифікації імпортованого ЗПГ, конвертують у заводи зі зрідження газу для його експорту. Очікується нарощування додаткових потужностей також у Малайзії (4,8 млн т у 2015–2016 рр.) та Росії (16,5 млн т у 2017–2019 рр.).

Разом із тим мають місце певні проблеми на щойно збудованих заводах. Так, зі значними затримками в 2015 р. споруджено новий завод в Австралії продуктивністю 8,5 млн т на рік, а потужності завершених у 2014 р. нових установок в Алжирі (4,7 млн т) використовуються тільки на 50 % через брак сировини. Нові установки, побудовані в Новій Гвінеї в 2014 р., почали давати продукцію лише в 2015 р.

На доповнення до проектів, які вже реалізуються, існує ряд проектів, що знаходяться на стадії вивчення, включаючи як запропоновані проекти сумарною річною потужністю 600 млн т, так і ті, що знаходяться на початковій стадії проектування (260 млн т).

Разом із тим реалізація частини проектів залежатиме від ситуації на ринку нафти і газу. По-перше, вони будуть прибутковими за ціни 70–80 дол США за

барель нафти. По-друге, очікується, що основним споживачем ЗПГ буде Китай, але зниження темпів розвитку країни може призвести до перегляду перспективних потреб в енергії. По-третє, вартість будівництва заводів ЗПГ у 2007–2013 рр. зростає більш ніж удвічі порівняно з 2000–2006 рр., в основному, через підвищення вартості робочої сили в США. По-четверте, велика кількість нових потужностей, які зараз знаходяться на стадії реалізації, можуть перенаситити ринок, принаймні до 2020 р., що негативно вплине на рішення будівництва нових заводів. Частина компаній вже відмовилася від нових проектів. Так, наприклад, зробила компанія Royal Dutch Shell відносно нового проекту в Австралії. Тому найближчим часом очікується менше нових проектів ЗПГ, ніж було заявлено. Оскільки заводи ЗПГ будуються протягом 4–6 років, перенесення строків нового будівництва на 1–2 роки може призвести до більш напруженого ринку ЗПГ на початку 2020-их років.

<http://www.lngworldnews.com/qnb-increase-in-lng-capacity-to-cause-supply-glut-by>

Відкриття великого газового родовища на шельфі Єгипту

За повідомленням італійської компанії ENI, на глибоководній площі Zohr, що в Середземному морі, відкрито нове гігантське газове родовище. Воно знаходиться в межах морської економічної зони Єгипту на глибині моря 1450 м у блоці Shorouk. Родовище займає площу близько 100 км², запаси газу можуть становити 840 млрд м³, воно – найбільше серед відкритих в Єгипті та Середземному морі загалом. Свердловина Zohr 1X NFW, пробурена на глибину 4131 м, відкрила нафтогазоносні породи міоцену потужністю 630 м із прекрасними колекторськими властивостями. Компанія ENI через свою дочірню компанію IEOC Production володіє 100-відсотковими правами на розвідання згаданого блоку та є оператором концесії.

<http://www.lngworldnews.com/eni-discovers-huge-gas-field-off-egypt>