

УДК 622.691.4.004.67

## ОСНОВИ РОЗРОБКИ МЕТОДІВ РЕГУЛЮВАННЯ РЕЖИМУ РОБОТИ СКЛАДНИХ ГАЗОТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

**Д. Ф. Тимків, Р. Г. Онацко, О. Т. Михалевич**

*Іванор-Франківський національний технічний університет нафти і газу;  
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;  
тел. +380 (422) 4-93-58; e-mail: [public@ifdtung.if.ua](mailto:public@ifdtung.if.ua)*

*Побудовано модель газотранспортної системи, призначеної для аналізу газових потоків та керування процесом транспортування газу.*

**Ключові слова:** *газотранспортна система, режим роботи, компресорна станція, газорозподільна станція, підземне сховище газу.*

Україна володіє великою і складною газотранспортною системою, від ефективної роботи якої залежить економіка всієї країни. Вміння оцінювати неефективні режими транспортування газу, оптимізувати його потоки – основа наукової концепції ефективного використання систем газопостачання. Можливість оптимізації режимів роботи ГТС пояснюється багатовартісністю системи, задані режими роботи якої можуть забезпечуватися численними варіантами роботи газопроводу.

Газотранспортна система, здебільшого, має складну геометричну структуру: наявність кількох ниток, з'єднаних перемичками, лупінгів, численні прості та складні за структурою відгалуження до споживачів тощо. Енергетичними об'єктами є компресорні станції (КС), до складу яких входять цехи з різними типами ГПА. Внаслідок реконструкції системи у кожному цеху працюють ГПА з різними характеристиками, тому можливі варіанти їх роботи за типами працюючих ГПА, за схемою їх спільної роботи (послідовна, паралельна, послідовно-паралельна) і, зрештою, за режимами роботи кожного ГПА (число обертів нагнітача). У зв'язку з цим існує велика кількість варіантів роботи і широке коло можливостей для оптимізації самої системи.

Окрім того, різке збільшення чи зменшення забору газу призводить до неусталеності його течії трубопроводом. До аналогічних наслідків призводить і зменшення чи збільшення об'єму підкачування газу, раптове увімкнення чи вимкнення КС, відкриття чи закриття засувки.

Перехідні режими роботи газопроводу супроводжуються значною та інтенсивною зміною тиску, що порушує нормальну роботу газопроводу, а в деяких випадках призводить до його руйнування. Для підтримки оптимальних параметрів роботи газопроводу в заданих режимах необхідно розробити математичні моделі оперативного керування складними газотранспортними системами.

Щоб побудувати модель ГТС, призначену для аналізу газових потоків та керування процесом транспортування газу, необхідно побувати її топологічну та геометричну моделі, сформулювати рівняння, що

описують рух газу через кожен елемент ГТС, встановити моделі механічної та теплової взаємодії газу з кожним таким елементом, встановити умови спряження параметрів термодинамічного стану та руху газу, на межах сусідніх елементів. У рамках такої моделі можна формулювати ті чи інші задачі аналізу газових потоків у ГТС чи оптимального керування її роботою, а відтак, використовуючи відповідні методи розв'язування таких задач, здійснювати їх числову реалізацію.

ГТС складається великої кількості елементів декількох різнорідних типів, з'єднаних між собою. Для опису з'єднань ГТС кожен такий елемент, крім підземних сховищ газу, можна розглядати з топологічної точки зору як відрізок прямої, що своїми кінцями (обома чи лише одним) з'єднаний із кінцями деякої множини інших відрізків, котрі репрезентують інші елементи цієї ГТС. Таким чином, отримуємо топологічну модель ГТС, яка має вигляд графа (рис.2). Розрізнятимемо ребра графа двох типів: внутрішнє ребро, кожен кінець якого з'єднаний принаймні з одним кінцем іншого елемента, і кінцеве (термінальне) ребро, під'єднане до графа лише одним кінцем. Серед термінальних вирізнятимемо орієнтовані ребра: вхідні, які відповідають входам ГТС, та вихідні, що відповідають її виходам, а також глухі ребра. Такі глухі ребра необхідно враховувати в математичні моделі, оскільки, хоч газ через них і не перетікає, вони виконують акумулюючі функції, і тому опосередковано впливають на газові потоки в ГТС.

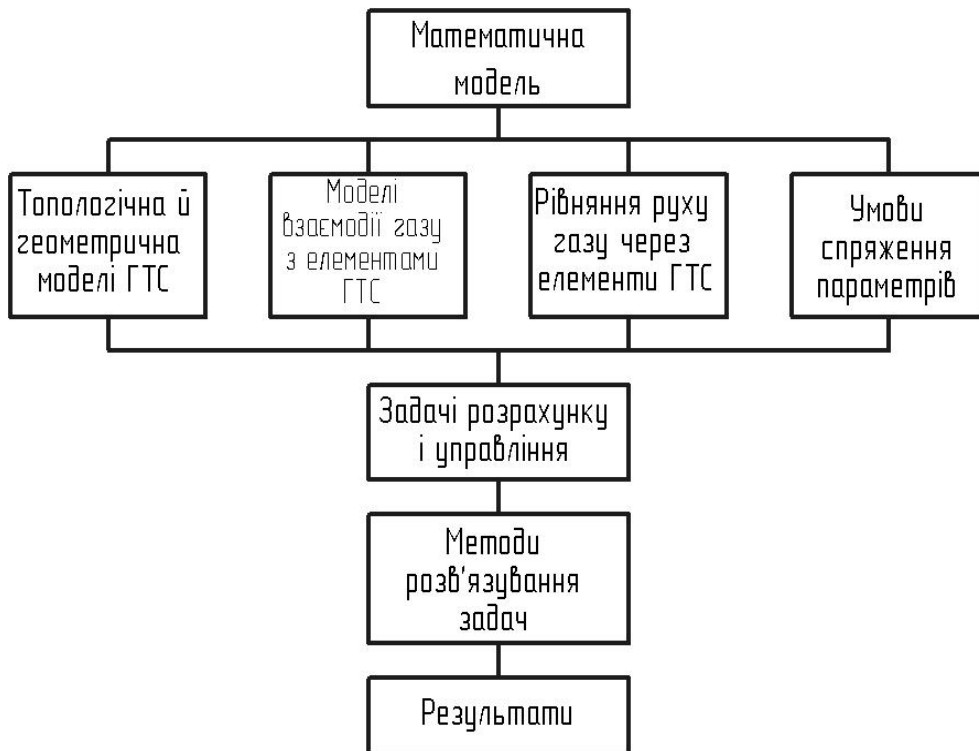


Рис. 1. Структура моделі ГТС

Аналізуючи роботу споруд ГТС доходимо до можливості класифікації їх з точки зору врахування в математичній моделі геометричних розмірів цих об'єктів. Для цього введемо поняття часу  $\tau$  проходження газу через об'єкт ГТС. Нехай  $w$  – характерна швидкість руху газу в межах деякого об'єкта, а  $l$  – його характерний розмір у напрямку руху газу. Тоді характерний час проходження газу через цей об'єкт визначиться як

$$\tau = l/w. \quad (1)$$

Тож, очевидно, що вивчаючи поведінку ГТС на проміжках часу  $\Delta t$ , можна не брати до уваги в математичній моделі скінченність розмірів тих об'єктів, для яких виконується умова

$$\tau \ll \Delta t. \quad (2)$$

Із огляду на це поділятимемо математичні моделі об'єктів, що входять до складу ГТС, на три типи:

- 1 тип: об'єкти зі зосередженими параметрами;
- 2 тип: одновимірні об'єкти з розподіленими параметрами;
- 3 тип: дво- та тривимірні об'єкти з розподіленими параметрами.

У задачах моделювання процесу транспортування газу, керування газотранспортною мережею та оптимізації режимів її роботи до об'єктів зі зосередженими параметрами будемо відносити компресорні станції, газорозподільні станції, перемички, запірну арматуру, вузли редукування тиску. До одновимірних об'єктів із розподіленими параметрами в таких задачах відноситимемо магістральні трубопроводи та переходи. Підземні сховища газу слід розглядати як тривимірні або двовимірні об'єкти з розподіленими параметрами.

Таким чином, топологічну модель ГТС можна представити у вигляді дискретно-континуальної системи, що схематично складається з графа і кількох три- чи двовимірних областей простору (рис.2). Ребра цього графа являють собою одновимірні об'єкти з розподіленими параметрами (магістральні трубопроводи та переходи), а вузли – об'єкти зі зосередженими параметрами (розгалуження, компресорні станції, об'єкти запірної арматури, редуктори тощо). Тривимірні та двовимірні області репрезентують у цій моделі підземні сховища газу, вони пов'язані з графом ГТС відповідними ребрами.

Рух газу в ГТС відбувається згідно із фізичними законами, котрі виражають збереження маси, імпульсу та енергії, а також законами термодинаміки, що описують термодинамічні властивості газової суміші, якою є природний газ.

Беручи до уваги, що до складу ГТС входять елементи, в яких відбувається одно- дво- та тривимірний рух транспортованого газу, запишемо систему рівнянь газової динаміки спочатку для загального тривимірного випадку. Основу цієї системи складають балансові рівняння, котрі виражають закони збереження речовини, імпульсу та енергії.

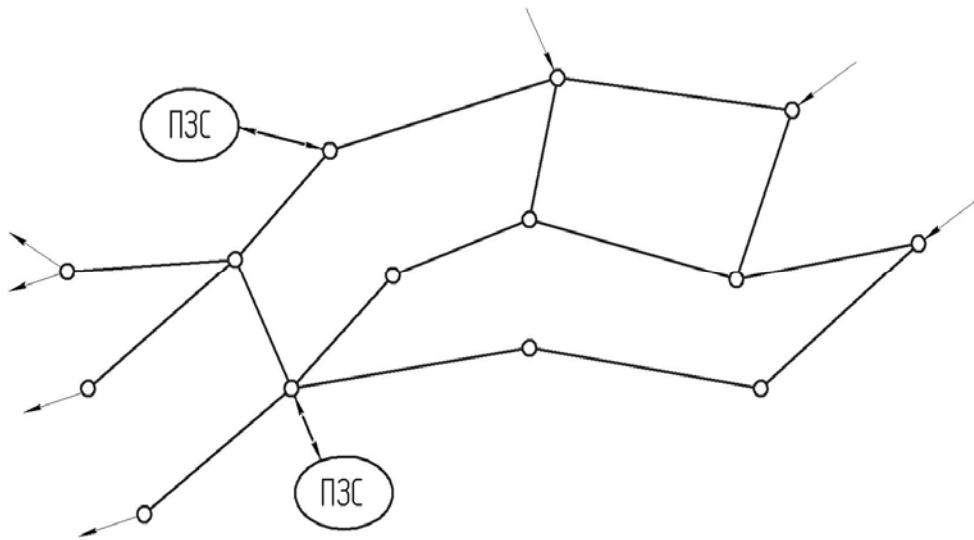


Рис. 2. Топологічна модель ГТС

Рівняння балансу маси

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \cdot V_i) = 0, \quad (3)$$

де  $t$  – час,  $x_i$  – декартові координати ( $i = 1, 2, 3$ ),  $V_i$  – компоненти локальної швидкості руху газу,  $\rho$  – густина газу.

Рівняння балансу імпульсу

$$\frac{\partial \rho \cdot V_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \cdot V_i \cdot V_j + p \cdot \delta_{ij}) = -\rho \cdot F_i^{\text{тр}} - \rho \cdot g \frac{\partial h}{\partial x_i}, \quad (4)$$

де  $p$  – тиск газу,  $\delta_{ij}$  – дельта Кронеккера,  $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$ ,  $F_i^{\text{тр}}$  – декартові компоненти сили тертя, розраховані на одиницю маси газу,  $g$  – прискорення вільного падіння,  $h$  – висота точки над рівнем моря.

Термодинамічні властивості газу  $c_V$ ,  $c_p$ ,  $k_p$  є функціями параметрів стану за сталого складу газової суміші. Це співвідношення виду:

$$c_V = f_{c_V}(T, \rho), \quad c_p = f_{c_p}(T, \rho), \quad k_p = f_{k_p}(T, \rho). \quad (5)$$

Функції  $f_{c_V}(T, \rho)$ ,  $f_{c_p}(T, \rho)$  та  $f_{k_p}(T, \rho)$  для реальних газів можна визначати експериментально застосовуючи відомі методики.

На підставі цих співвідношень можемо записати вираз для повного диференціалу внутрішньої енергії як функції змінних  $T$  і  $\rho$ :

$$du = c_V \cdot dT + \left( \frac{c_p - c_V}{k_p} + \frac{p}{\rho^2} \right) d\rho. \quad (6)$$

Виходячи із відомих співвідношень отримуємо наступне рівняння теплопровідності для газу

$$\rho \cdot c_V \frac{dT}{dt} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \kappa \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = - \left( \frac{c_p - c_V}{k_p} \right) \rho \frac{d\rho}{dt} + \rho \cdot V_i \cdot F_i^{\text{TP}} + Q^{\text{ЗОВН}}, \quad (7)$$

де  $Q$  – приплив ( $Q > 0$ ) або відтік ( $Q < 0$ ) тепла в об’ємі, обумовлений теплообміном газу з об’єктами ГТС та довкіллям, наприклад, крізь стінки труби або з пористим середовищем у ПСГ.

Використовуючи оператор субстанціональної похідної за часом рівнянню (5) надаємо вигляду

$$\rho \cdot c_V \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \kappa \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \rho \cdot c_V \cdot V_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = - \left( \frac{c_p - c_V}{k_p} \right) \cdot \rho \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} + V_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right) + \rho V_i F_i^{\text{TP}} + Q^{\text{ЗОВН}}. \quad (8)$$

Беручи до уваги рівняння нерозривності (3), рівнянню теплопровідності (8) можна надати вигляду

$$\rho \cdot c_V \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \kappa \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \rho \cdot c_V \cdot V_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = - \left( \frac{c_p - c_V}{k_p} \right) \cdot \rho^2 \frac{\partial V_i}{\partial x_i} + \rho \cdot V_i \cdot F_i^{\text{TP}} + Q^{\text{ЗОВН}}. \quad (9)$$

При заданих функціях  $f_p(T, \rho)$ ,  $f_\kappa(T, \rho)$ ,  $f_{c_V}(T, \rho)$ ,  $f_{c_p}(T, \rho)$  та  $f_{k_p}(T, \rho)$  диференціальні рівняння в частинних похідних (3), (4), (9) утворюють ключову систему рівнянь для опису процесів перенесення маси, імпульсу та енергії в транспортованому через ГТС газі. Для формулювання задач розрахунку та оптимізації транспортування газу та оптимального керування роботою ГТС до рівнянь (3), (4), (9) слід додати початкові та граничні умови, а також інші умови, що визначають взаємодію транспортованого газу зі спорудами ГТС та довкіллям. Необхідно також виразити через параметри стану та руху газу силу тертя  $F_i^{\text{TP}}$  і параметр  $Q^{\text{ЗОВН}}$ , котрий визначає теплообмін транспортованого газу з довкіллям.

Наведені рівняння газової динаміки, які описують перенесення маси, імпульсу та енергії в газотранспортній мережі, пов’язують параметри термодинамічного стану і руху газу. Параметрами термодинамічного стану є: густина  $\rho$  [кг/м<sup>3</sup>], тиск  $p$  [Н/м<sup>2</sup>], температура  $T$  [К], питома ентропія  $s$  [Дж/кгК], масові концентрації компонент газової суміші  $\xi_1, \dots, \xi_n$  та їх хімічні потенціали  $\mu_1, \dots, \mu_n$  [Дж/кг]. Окрім того важливими параметрами є термодинамічні потенціали газу: питома внутрішня енергія  $u$  [Дж/кг], вільна енергія  $f = u - Ts$  [Дж/кг], ентальпія  $i = u + p\rho^{-1}$  [Дж/кг]. Тиск  $p$  і питома об’єм  $v = \rho^{-1}$ , температура  $T$

і питома ентропія  $s$ , хімічні потенціали  $\mu_1, \dots, \mu_n$  та відповідні їм масові концентрації компонент газової суміші  $\mu_1, \dots, \mu_n$  утворюють пари спряжених термодинамічних параметрів стану газової суміші. Якщо відомі функції (10), (11), (12)

$$u = u(s, v, \xi_1, \dots, \xi_n), \quad (10)$$

$$f = f(T, v, \xi_1, \dots, \xi_n), \quad (11)$$

$$u = u(s, v), \quad f = f(T, v), \quad (12)$$

які виражають термодинамічні потенціали через відповідні параметри стану, то за допомогою рівнянь (13), (14), (15), (16)

$$T = \left( \frac{\partial u}{\partial s} \right)_{v, \{\xi_i\}}, \quad p = - \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_{s, \{\xi_i\}} = \rho^2 \left( \frac{\partial u}{\partial \rho} \right)_{s, \{\xi_i\}}, \quad \mu_i = \left( \frac{\partial u}{\partial \xi_i} \right)_{s, v, \{\xi_i\}'}, \quad (13)$$

$$s = - \left( \frac{\partial f}{\partial T} \right)_{v, \{\xi_i\}}, \quad p = - \left( \frac{\partial f}{\partial v} \right)_{T, \{\xi_i\}} = \rho^2 \left( \frac{\partial f}{\partial \rho} \right)_{T, \{\xi_i\}}, \quad \mu_i = \left( \frac{\partial f}{\partial \xi_i} \right)_{T, v, \{\xi_i\}'}, \quad (14)$$

$$T = \left( \frac{\partial u}{\partial s} \right)_v, \quad p = - \left( \frac{\partial u}{\partial v} \right)_s = \rho^2 \left( \frac{\partial u}{\partial \rho} \right)_s, \quad (15)$$

$$s = - \left( \frac{\partial f}{\partial T} \right)_v, \quad p = - \left( \frac{\partial f}{\partial v} \right)_T = \rho^2 \left( \frac{\partial f}{\partial \rho} \right)_T \quad (16)$$

можна виразити половину параметрів стану через спряжені їм параметри, вибрані як незалежні. Ключова система рівнянь (3), (4), (9) залежить від термодинамічних параметрів стану – густин  $\rho$ , тиску  $p$ , температури  $T$  та масових концентрацій компонент газової суміші  $\xi_1, \dots, \xi_n$ . Зокрема, якщо під час транспортування склад газової суміші не змінюється, то таких параметрів є три, а в якості незалежних параметрів стану можна вибрати одну із двох пар – густину  $\rho$  та температуру  $T$  або ж тиск  $p$  та температуру  $T$ . Тоді третій параметр (у першому випадку – це тиск, а другому – густина) слід виразити у цих рівняннях через інші два за допомогою рівняння стану

$$s = s(T, v), \quad p = p(T, v). \quad (17)$$

Рух газу в ГТС можна визначати компонентами вектора швидкості  $V_i$  або компонентами потоку маси  $J_i = \rho \cdot V_i$ . Для опису руху газу в трубопроводах часто використовують також пов'язані з цими параметрами технічні величини – масову витрату  $M$  [кг/с] та комерційну витрату  $q$  [м<sup>3</sup>/доб].

Таким чином, у рамках описаної математичної моделі задачі розрахунку та оптимізації режимів транспортування газу, а також оптимального керування роботою ГТС можна розділити на такі групи визначальних параметрів  $(\rho, V_i, T)$ ,  $(p, V_i, T)$ ,  $(\rho, J_i, T)$ ,  $(p, J_i, T)$ . Від вибору ключових параметрів істотно залежить характер нелінійності ключових рівнянь.

Параметри стану та руху газу  $(\rho, p, V_i, J_i, T)$  загалом є функціями часу  $t$  та просторових координат  $x_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ .

$$\begin{aligned} \rho &= \rho(t, x_1, \dots, x_3), \quad p = p(t, x_1, \dots, x_3), \quad T = T(t, x_1, \dots, x_3), \\ V_i &= V_i(t, x_1, \dots, x_3), \quad J_i = J_i(t, x_1, \dots, x_3). \end{aligned} \quad (18)$$

Рух газу, за якого визначальні параметри його стану залежать від координат  $x_i$  і часу  $t$ , називатимемо нестационарним. Якщо параметри, котрі визначають термодинамічний стан та рух газу, залишаються незмінними в часі, тобто

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial V_i}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial J_i}{\partial t} = 0, \quad (19)$$

то такий рух є стаціонарним.

У стаціонарному випадку ключові рівняння спрощуються, оскільки визначальні параметри в них залежні лише від просторових координат

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \cdot V_i) = 0;$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \cdot V_i \cdot V_j + p \cdot \delta_{ij}) = -\rho \cdot F_i^{\text{тр}} - \rho \cdot g \frac{\partial h}{\partial x_i}; \quad (20)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \kappa \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \rho \cdot c_V \cdot V_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = - \left( \frac{c_p - c_V}{k_p} \right) \cdot \rho \cdot V_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \rho \cdot V_i \cdot F_i^{\text{тр}} + Q^{\text{зовн}}.$$

Отримана аналітична залежність є теоретичною основою для подальшої розробки методів контролю та регулювання режиму роботи складних ГТС. Встановлено параметри, характер зміни яких дає можливість приймати реальні рішення, спрямовані на найбільш ефективну їх експлуатацію.

### Література

1. Прялов С.Н. Повышение адекватности моделирования транспортирования газа по трубопроводам / С.Н. Прялов // Газовая промышленность. – 2007. – №1. – С.66-69.
2. Юкин Г.А. Оптимизация параметров работы компрессорных станций многониточных газопроводов / Г.А. Юкин // Актуальные проблемы современной науки. – 2002. – №5. – С.243-244.

3. Селезнев В.Е. Методы и технологии численного моделирования газо-проводных систем / В.Е. Селезнев, В.В. Алешин, Г.С. Клишин. – М.: КомКнига, 2005. – 327с.

*Стаття поступила в редакційну колегію 21.07.2009 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., професором Грудзом В.Я.*

## **BASES OF DEVELOPMENT OF METHODS OF ADJUSTING OF OFFICE HOURS OF THE DIFFICULT GAS-TRANSPORT SYSTEMS**

**D. F. Timciv, R. G. Onatsco, O. T. Mihalevich**

*Ivano-Frankivs'k National Technical University of Oil and Gas;  
76019, Ivano-Frankivs'k, Carpats'ka street,15;  
tel.+380 (322) 4-93-58; e-mail: public@ifdtung.if.ua*

*The model of the gas-transport system intended for the analysis of gas streams and process control of transporting of gas is built.*

**Keywords:** *gas-transport system, office hours, compressor station, gas-distributing station, dug-out of gas.*