

## ВИЗНАЧЕННЯ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ГАЗОТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ РОЗГАЛУЖЕНОЇ СТРУКТУРИ

*М.І.Фик, М.Д.Середюк, М.П.Андрійшин*

*ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42166  
e-mail tzn g@n un g. e d u. u a*

*Разработаны методология, вычислительный алгоритм и программное обеспечение для определения пропускной способности газопровода с произвольным количеством компрессорных станций, имеющего разветвленную структуру и подающего газ попутным потребителям.*

*Methodology, calculation algorithm and software for determination of capacity of bifurcated gas pipelines with any number of compressor stations that deliver gas to itinerary consumers are developed.*

Газотранспортна система України – це складна за структурою трубопровідна система, яка виконує дві функції – транзитне транспортування російського газу на експорт і постачання газу вітчизняним споживачам. Аналіз режимів роботи газопроводів України свідчить, що деякі з них виконують переважно функцію транзитних поставок газу за кордон, для інших – домінує функція забезпечення газом вітчизняних споживачів. Перший тип газопроводів прийнято називати транзитними газопроводами, а другий – розподільними. Більша частина газопроводів України поєднує як транзитні, так і розподільні функції.

Як для транзитних, так і для розподільних газопроводів важливим є визначення їх пропускної здатності залежно від схеми роботи елементів газотранспортної системи та сезонних змін умов перекачування.

У роботах [1, 2] нами розроблені методика, обчислювальні алгоритми і програмне забезпечення для визначення пропускної здатності транзитних кільканиткових газопроводів з урахуванням газодинамічної взаємодії між нитками для різних сезонних умов перекачування.

Метою досліджень є розробка методології та обчислювальних алгоритмів визначення пропускної здатності та режиму роботи розподільного газопроводу з врахуванням значних шляхових відборів газу при будь-якій комбінації підключення споживачів з урахуванням сезонних змін умов перекачування та споживання газу.

Під пропускною здатністю будемо розуміти максимальну кількість газу, яку можна транспортувати і поставляти споживачам для певної комбінації підключених споживачів, при заданій кількості працюючих газоперекачувальних агрегатів (ГПА) на кожній компресорній станції (КС) та за умов навколишнього середовища, що відповідають розрахунковому періоду. Розрахунок проводиться за певних граничних умов: при заданих значеннях тиску і температури газу на вході у першу компресорну станцію, заданому тиску газу у кінці газопроводу та заданих тисках газу на вході шляхових споживачів.

Об'єктом досліджень є одноступенчова розгалужена газотранспортна система з довільною кількістю ділянок, компресорні станції якої у загальному випадку оснащені різними типами ГПА з газотурбінним приводом. На будь-якій ділянці магістрального газопроводу може передбачатися довільна кількість відгалужень і відводів. Під відгалуженням будемо розуміти елемент газотранспортної системи, який подає газ двом і більше споживачам. Під відводом будемо розуміти газопровід, який подає газ одному споживачу.

Вважаємо, що газотранспортна система за геометричною структурою має вигляд «складного дерева», тобто складається з основної магістралі та відгалужень, які, в свою чергу, мають відводи.

Підключення до системи будь-якого відгалуження чи відводу змінює гідравлічний опір системи загалом, що у свою чергу впливає на її пропускну здатність і режими роботи компресорних станцій.

Нехай магістральний газопровід має  $n_k$  компресорних станцій, оснащених ГПА з газотурбінним приводом. На кожній із  $n_k$  ділянок магістралі підключено  $nv_i$  відгалужень. Кожне відгалуження може мати  $ndv_{ij}$  ділянок. До кожного відгалуження підключено  $ndv_{ij} - 1$  відводів. Якщо відгалуження має лише одну ділянку, то воно має статус відводу.

В обчислювальному алгоритмі параметрам ділянок основної магістралі між шляховими відборами газу присвоюємо подвійний індекс  $ij$ , де  $i$  – номер ділянки магістрального газопроводу між КС,  $j$  – номер шляхового відбору газу. Ділянкам відгалужень присвоюємо потрійний індекс  $ijk$ , де  $k$  – номер ділянки  $ij$ -ого відгалуження. Відводам від відгалужень також присвоюємо потрійний індекс  $ijk$ , де  $k$  – номер ділянки  $ij$ -ого відгалуження, до якої під'єднаний відвід.

Пропускна здатність складної газотранспортної системи визначається за таких граничних умов: заданих значеннях тиску і темпера-

тури газу на вході у нагнітачі першої КС  $P_{ax1}, T_{ax1}$ , заданому тиску газу в кінці газопроводу  $P_{kнк}$ , заданих значеннях тиску газу у кінці відгалужень  $P_{kvнij}$  та відводів  $P_{kvнijk}$ .

Методика розрахунку магістрального газопроводу із розгалуженою структурою базується на відомих методах розрахунку параметрів роботи відцентрових нагнітачів за їх зведеними газодинамічними характеристиками та стаціонарних моделях руху реального газу в складних за структурою трубопровідних системах.

Запропонована методика дає можливість:

- прогнозувати пропускну здатність газопроводу при відключенні всіх відгалужень і відводів для різних схем роботи ГПА на кожній КС з врахуванням сезонних змін умов перекачування;

- прогнозувати пропускну здатність газопроводу і режим роботи кожної КС для будь-якої комбінації підключених відгалужень і відводів до основної магістралі;

- за результатами розрахунків проводити оптимізацію режимів роботи складних газотранспортних систем залежно від заданої транспортної роботи за критерієм мінімальних енерговитрат.

В основу розрахунку режиму роботи КС нами закладені залежності коефіцієнта підвищення тиску  $\varepsilon_n$  (за умови, що зведена відносна обертова частота дорівнює одиниці), політропічного ККД  $\eta_{mol}$  і зведеної відносної внутрішньої потужності  $\left(\frac{N}{\rho_{6c}}\right)_{36}$  від зведеної об'ємної подачі нагнітача за умов на його вході  $Q_{36}$  у вигляді

$$\varepsilon_n = a_1 + a_2 Q_{36} + a_3 Q_{36}^2; \quad (1)$$

$$\eta_{mol} = b_1 + b_2 Q_{36} + b_3 Q_{36}^2; \quad (2)$$

$$\left(\frac{N_i}{\rho_{6c}}\right)_{36} = c_1 + c_2 Q_{36} + c_3 Q_{36}^2, \quad (3)$$

де  $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3$  – коефіцієнти математичних моделей, визначені певним математичним методом шляхом обробки паспортних чи фактичних характеристик відцентрового нагнітача.

Обчислювальний алгоритм передбачає перевірку розрахованих параметрів роботи КС на виконання таких технологічних обмежень:

- тиск газу нагнітання не повинен перевищувати максимально допустимого значення із умов міцності трубопроводів та обладнання;

- зведена продуктивність нагнітача повинна бути не меншою за мінімальне значення  $Q_{min}$ , яке забезпечує роботу нагнітача без помпажу;

- потужність, спожита нагнітачем, повинна бути не більшою за наявну потужність газотурбінної установки;

- зведена відносна обертова частота нагнітача повинна бути не меншою за мінімально допустиму паспортну величину.

Розрахунки режимів роботи компресорних станцій проводяться з врахуванням наведених вище технологічних обмежень параметрів їх роботи. Якщо у процесі розрахунків будь-яке технологічне обмеження порушується, то передбачається вимушене регулювання шляхом зменшення обертової частоти нагнітачів відповідної компресорної станції. Якщо застосування даного способу регулювання не дає змоги добитися виконання всіх технологічних обмежень та узгодження параметрів роботи компресорних станцій, то методикою передбачається вимушене перепускання частини потоку газу із нагнітального колектора у всмоктувальний, або зміна кількості працюючих ГПА на відповідній КС.

Наявну потужність газотурбінної установки для привода відцентрових нагнітачів компресорної станції з врахуванням сезонних змін умов перекачування та витрати газу на власні потреби КС визначаємо за методикою, рекомендованою ОНТП 51-1-85.

Основною формулою для виконання гідравлічного розрахунку будь-якої ділянки складного газопроводу є рівняння для визначення об'ємної витрати газу (млн.м<sup>3</sup>/д за стандартних умов) у вигляді

$$Q = 105,087 \cdot E \cdot d^{2,5} \sqrt{\frac{P_H^2 - P_K^2}{\Delta \lambda z_{cp} T_{cp} L}}, \quad (4)$$

де:  $E$  – коефіцієнт гідравлічної ефективності газопроводу;

$d$  – внутрішній діаметр газопроводу, м;

$P_H, P_K$  – абсолютний тиск газу на початку і в кінці ділянки відповідно, МПа;

$\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного опору;

$z_{cp}$  – середнє значення коефіцієнта стисливості газу;

$T_{cp}$  – середнє значення температури газу на ділянці газопроводу, К;

$L$  – довжина ділянки газопроводу, км.

В обчислювальному алгоритмі рівняння (4) розв'язано відносно тиску газу в кінці ділянки  $P_K$

$$P_K = \sqrt{P_H^2 - \frac{\Delta \lambda z_{cp} T_{cp} L Q^2}{11043 \cdot E^2 d^5}}. \quad (5)$$

Середнє значення температури газу на ділянці газопроводу визначаємо з врахуванням дії ефекту Джоуля-Томпсона [1, 2]

$$T_{cp} = T_{zp} + \frac{T_H - T_{zp}}{aL} (1 - e^{-aL}) - D_i \frac{P_H^2 - P_K^2}{2aLP_{cp}} \left[ 1 - \frac{1}{aL} (1 - e^{-aL}) \right], \quad (6)$$

де:

$$a = \frac{0,225 K d_n}{Q \Delta c_p}, \quad (7)$$

$T_{zp}$  – середня за період, що розглядається, температура ґрунту на глибині укладання трубопроводу, К;

$T_n$  – температура газу на початку ділянки газопроводу, К;

$D_i$  – середнє значення коефіцієнта Джоуля-Томпсона на ділянці, К/МПа;

$K$  – повний коефіцієнт теплопередачі від газу в навколишнє середовище, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$P$  – середнє на ділянці значення тиску газу, МПа;

$d_n$  – зовнішній діаметр газопроводу, м;

$\Delta$  – відносна густина газу за повітрям;

$c_p$  – середнє значення теплоємності газу на ділянці газопроводу, кДж/(кг·К).

Температуру газу у кінці ділянки газопроводу знаходимо за формулою

$$T_k = T_{zp} + (T_n - T_{zp})e^{-aL} - D_i \frac{P_n^2 - P_k^2}{2aLP_{cp}} (1 - e^{-aL}). \quad (8)$$

Пропускна здатність розгалуженого газопроводу знаходиться методом ітерацій по витраті газу в елементах системи з врахуванням рівнянь матеріального та енергетичного балансу.

Методика дає змогу розрахувати всі можливі варіанти підключення відгалужень і відводів до основної магістралі. Для цього у програмі передбачається введення масиву коефіцієнтів роботи відгалужень  $S_{ij}$  і відводів від них  $SS_{ijk}$ , які приймаються рівними одиниці при працюючому елементі? і рівними нулю – якщо відгалуження або відвід відключений від газотранспортної системи.

Спочатку методом ітерацій по витраті газу визначається пропускна здатність магістрального газопроводу і режими роботи компресорних станцій при перекачуванні газу з відключеними відгалуженнями та відводами. Знайдені параметри є першим наближенням роботи магістрального газопроводу з підключеними шляховими відборами газу.

За витратою газу, знайденою при роботі без шляхових відборів газу, прораховуємо режим роботи першої КС і за формулами (5)-(8) знаходимо тиск і температуру газу в точці приєднання першого відгалуження  $P_{k11}$  і  $T_{k11}$ . Із рівняння енергетичного балансу маємо, що тиск і температура газу у кінці ділянки магістралі дорівнює тиску і температурі на початку відповідної ділянки відгалуження

$$P_{nv111} = P_{k11}, \quad T_{nv111} = T_{k11}. \quad (9)$$

Задаємося значенням витрати газу, значно меншим від пропускної здатності, на першій ділянці першого відгалуження  $Q_{v111}$ . Методом ітерацій за формулами (5)-(8) знаходимо тиск і температуру газу в кінці даної ділянки  $P_{kv111}$  і  $T_{kv111}$ .

Задаємося значенням витрати газу, значно меншим від пропускної здатності, на відводі від першої ділянки першого відгалуження. Із рівняння енергетичного балансу маємо, що тиск і температура газу у кінці ділянки відгалуження дорівнює тиску і температурі на початку відповідного відводу

$$P_{nv111} = P_{kv111}, \quad T_{nv111} = T_{kv111}. \quad (10)$$

Методом ітерацій за формулами (5)-(8) знаходимо тиск і температуру газу у кінці відводу  $P_{kw111}$  і  $T_{kw111}$ . Якщо розрахований тиск перевищує задане значення кінцевого тиску  $P_{kw111}$ ,

то збільшуємо витрату газу у відводі за умовою  $Q_{w111} = Q_{v111} + \Delta Q$ , (11)

де  $\Delta Q$  – крок зміни витрати газу.

У результаті ітерацій знаходимо витрату газу у відводі, за якої використовується наявний перепад тиску. Для створення умов рівномірного подавання газу кожному споживачу обмежуємо витрату газу у відводах від відгалужень, уводячи максимально допустимі їх значення.

Із рівняння матеріального та енергетичного балансу знаходимо витрату газу на другій ділянці відгалуження

$$Q_{v112} = Q_{v111} - Q_{w111}. \quad (12)$$

Друга і подальші ділянки відгалуження, а також відводи від них розраховуються аналогічно. У результаті знаходимо тиск і температуру газу у кінці останньої ділянки першого відгалуження  $P_{kv11ndij}$  і  $T_{kv11ndij}$ . Якщо розрахований тиск газу на вході до споживача перевищує задане значення кінцевого тиску  $P_{v111}$ , то збільшуємо витрату газу на першій ділянці першого відгалуження і повторюємо всі обчислювальні операції.

У результаті ітерацій знаходимо витрату газу на першій ділянці першого відгалуження, за якої використовується наявний перепад тиску.

Після завершення розрахунку першого відгалуження переходимо до розрахунку ділянки основної магістралі, що розміщена між першим і другим відгалуженням на перегоні між першою і другою компресорними станціями. Із рівнянь матеріального та енергетичного балансу маємо

$$Q_{12} = Q_{11} - Q_{v111}, \quad (13)$$

$$P_{n12} = P_{11}, \quad T_{n12} = T_{k11}. \quad (14)$$

Друга і подальші ділянки основної магістралі між шляховими відборами, а також приєднані до них відгалуження та відбори на перегоні між першою і другою компресорними станціями розраховуються аналогічно.

У результаті знаходимо витрату, тиск і температуру газу на вході у другу компресорну станцію. За формулами (1)-(3) з врахуванням наведених вище технологічних обмежень і витрат газу на власні потреби обчислюємо режимні параметри роботи другої компресорної станції. Це дає змогу визначити витрату, тиск і

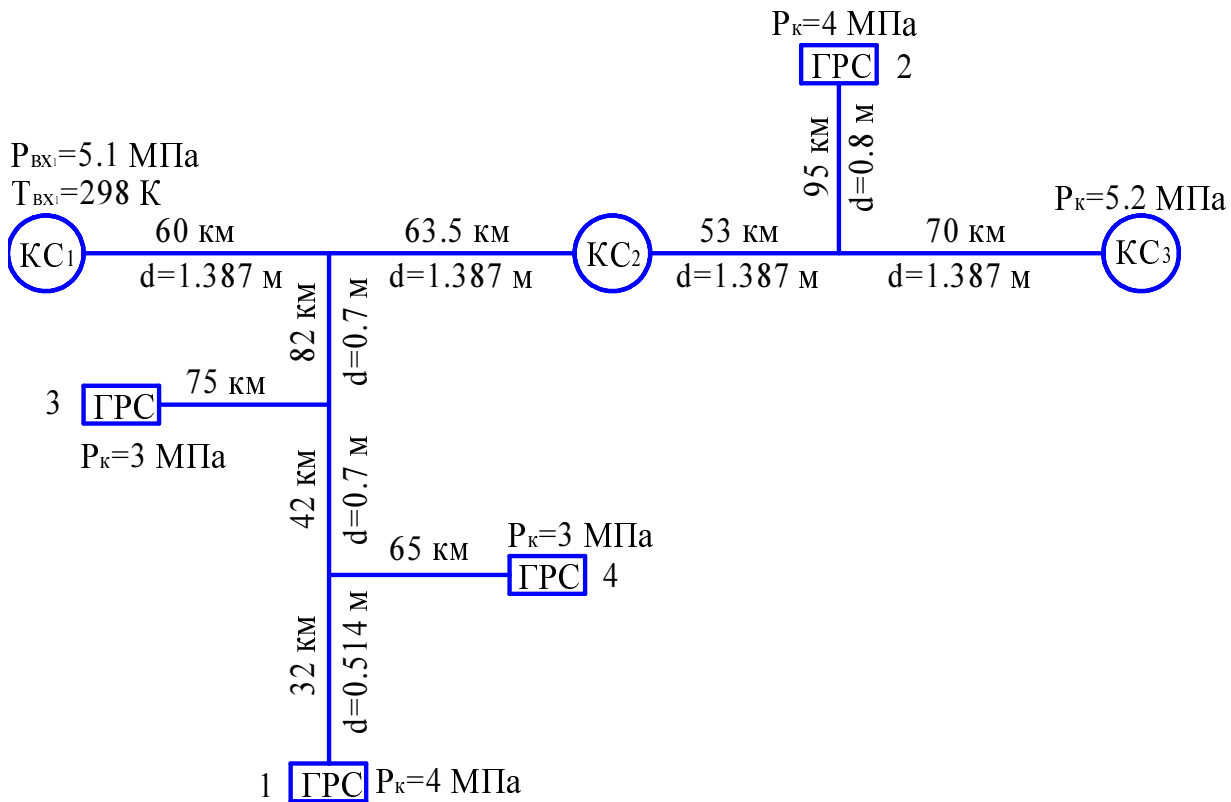


Рисунок 1 – Розрахункова схема розгалуженої газотранспортної системи

Таблиця 1 — Результати розрахунку пропускної здатності елемента розгалуженої газотранспортної системи

Варіанти підключення споживачів газу до магістралі	Витрата газу, млн.м <sup>3</sup> /д						
	на першій ділянці магістралі	на власні потреби КС	на вході першого споживача	на вході другого споживача	на вході третього споживача	на вході четвертого споживача	у кінці елемента газопроводу
Відгалуження і відводи не працюють	88,15	0,48	-	-	-	-	88,15
Одержує газ споживач 1	92,25	0,47	9,10	-	-	-	82,68
Одержує газ споживач 2	89,45	0,48	-	15,40	-	-	73,57
Одержують газ споживачі 1 і 2	93,40	0,46	8,90	14,95	-	-	69,09
Одержують газ споживачі 1 і 3	93,85	0,46	6,35	-	6,40	-	80,64
Одержують газ споживачі 1 і 4	93,35	0,46	5,75	-	-	5,80	81,34
Одержують газ споживачі 1, 3 і 4	94,10	0,46	4,35	-	4,50	4,50	80,29
Одержують газ споживачі 1, 2 і 4	94,40	0,46	5,65	14,90	-	5,70	67,69
Одержують газ споживачі 1, 2 і 3	94,90	0,46	6,20	14,75	6,25	-	67,24
Одержують газ споживачі 1, 2, 3 і 4	95,15	0,46	4,30	14,75	4,40	4,40	66,84

температуру газу на початку другого перегону магістрального газопроводу.

Друга і всі наступні ділянки магістрального газопроводу між компресорними станціями розраховуються аналогічно першій ділянці. У

результаті знаходимо витрату, тиск і температуру газу у кінці газотранспортної системи.

Порівнюємо між собою розрахований і заданий кінцевий тиск газу. Якщо різниця між ними перевищує необхідну точність обчислень,

то збільшуємо витрату газу через нагнітачі першої компресорної станції і знову розраховуємо методом ітерацій розгалужену газотранспортну систему.

Після досягнення необхідної точності обчислень розрахунки завершують. У результаті одержуємо пропускну здатність кожного елемента газотранспортної системи і режимні параметри роботи компресорних станцій для певного варіанта підключення відгалужень і відводів з урахуванням сезонних умов перекачування.

Описаний обчислювальний алгоритм реалізований нами у програмі VEGA. З метою апробації методики та програмного забезпечення визначимо пропускну здатність елемента газотранспортної системи, схема якого наведена на рисунку 1. Розрахунки виконуємо для зимових умов перекачування, яким відповідає температура ґрунту на глибині укладання трубопроводів  $T_{sp} = 276$  К і розрахункова температура повітря  $T_{нов} = 273$  К. Коефіцієнт гідравлічної ефективності приймаємо для ділянок магістрального газопроводу  $E = 0,97$ ; для ділянок відгалужень і відводів  $E = 0,95$ .

Приймаємо, що компресорні станції магістрального газопроводу оснащені газоперекачувальними агрегатами ГТК-10І. На кожній КС працюють паралельно 5 ГПА зазначеного типу.

Результати розрахунку пропускну здатності елемента розгалуженої газотранспортної системи за програмою VEGA наведені у таблиці 1.

Аналіз даних таблиці 1 свідчить, що залежно від схеми підключення відгалужень і відводів помітно змінюється кількість газу, що транспортується магістральним газопроводом, і частка газу, яка надходить до того чи іншого шляхового споживача. Таким чином, запропонована методика і програмне забезпечення дають змогу для газотранспортних систем із розгалуженою структурою достовірно прогнозувати обсяги транзитного перекачування газу магістральними газопроводами, а також обсяги надходження газу до шляхових споживачів для різних варіантів їх підключення із врахуванням сезонних змін умов роботи.

### *Література*

1 Середюк М.Д., Лісафін Д.В. Визначення пропускну здатності складних газотранспортних систем // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2004. – № 3(9). – С.69-78.

2. Середюк М.Д., Ксеніч А.І., Фик М.І. Визначення пропускну здатності кільканиткового газопроводу при роботі з відкритими перемичками на ділянках // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2006. – № 1(13). – С.75-82.