

Технічні науки

УДК 622.691.4

Григорський Станіслав Ярославович

кандидат технічних наук,

доцент кафедри газонафтопроводів та газонафтоосховищ

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Григорский Станислав Ярославович

кандидат технических наук,

доцент кафедры газонефтепроводов и газонефтехранилищ

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

Hryhorskyy Stanislav

PhD, Associate Professor of the

Department of Gas and Oil Pipelines and Gas and Oil Storages

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

Іванов Олександр Васильович

кандидат технічних наук,

доцент кафедри газонафтопроводів та газонафтоосховищ

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Иванов Александр Васильевич

кандидат технических наук,

доцент кафедры газонефтепроводов и газонефтехранилищ

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

Ivanov Oleksandr

PhD, Associate Professor of the

Department of Gas and Oil Pipelines and Gas and Oil Storages

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

**УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ ПРОПУСКНОЇ
ЗДАТНОСТІ ТА РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ СИСТЕМ
ТРАНСПОРТУ ТА ЗБЕРІГАННЯ ВУГЛЕВОДНЕВИХ ГАЗІВ НА
ОСНОВІ СУЧАСНИХ РІВНЯНЬ СТАНУ
УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПРОПУСКНОЙ
СПОСОБНОСТИ И РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ
СИСТЕМ ТРАНСПОРТА И ХРАНЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ
ГАЗОВ НА ОСНОВЕ СОВРЕМЕННЫХ УРАВНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ
IMPROVEMENT THE METHOD OF CALCULATION FLOW
CAPACITY AND REGIME PARAMETERS OF TRANSPORT AND
STORAGE HYDROCARBON SYSTEMS BASED ON THE MODERN
GAS EQUATIONS OF STATE**

***Анотація.** Удосконалено основне рівняння газопроводів із врахуванням динаміки зміни коефіцієнта стисливості природного газу по довжині трубопроводу. Із застосуванням методів регресійного аналізу отримано математичну модель для розрахунку коефіцієнта стисливості природного газу за умов магістрального транспорту на основі рівняння стану GERG-2008.*

***Ключові слова:** фундаментальне рівняння стану, коефіцієнт стисливості газу, основне рівняння газопроводу, реальний газ.*

***Аннотация.** Усовершенствовано основное уравнение газопроводов с учетом динамики изменения коэффициента сжимаемости природного газа по длине трубопровода. С применением методов регрессионного анализа получена математическая модель для расчета коэффициента сжимаемости природного газа при условиях магистрального транспорта на основе уравнения состояния GERG-2008.*

Ключевые слова: фундаментальное уравнение состояния, коэффициент сжимаемости газа, основное уравнение газопровода, реальный газ.

Summary. The basic equation of gas pipelines has been improved, taking into account the dynamics of changes in the compressibility factor of natural gas along the length of the pipeline. Using the methods of regression analysis, a mathematical model was obtained for calculating the compressibility factor of natural gas by the conditions of main gas pipelines based on the GERG-2008 equation of state.

Key words: fundamental equation of state, gas compressibility factor, gas pipeline basic equation, real gas.

В ряду визначальних параметрів при проектуванні і експлуатації систем транспорту, зберігання та розподілу газу важливе місце займає проблема надійності, що залежить від комплексу проектно-технологічних рішень і питань, пов'язаних з умовами експлуатації, які зумовлені низкою технологічних факторів і фізико-хімічними властивостями вуглеводневої сировини.

Успішний розвиток технологій транспорту, зберігання, розподілу і переробки вуглеводних газів неможливий без розширення арсеналу точних методів кількісного аналізу, які адекватно описують не тільки елементний склад, але і молекулярну будову і надмолекулярну структуру природного органічного матеріалу. Особливу увагу слід приділити точним розрахункам фізичних та термодинамічних властивостей природних газів із застосуванням сучасних рівнянь стану. Це дасть змогу отримати більш точні результати при обліку природного газу, теплогідрравлічних розрахунках трубопровідних комунікацій та розрахунках пропускної здатності систем транспорту, розподілу та зберігання вуглеводневих газів.

Також застосування новітніх рівнянь стану вуглеводневих газів, що базуються на величині вільної енергії Гельмгольца [1; 2; 3], дозволяє з мінімальною похибкою відносно експериментальних даних (до 1 %) розрахувати основні фізичні властивості природного газу, які безпосередньо впливають на гідравлічний та тепловий режим роботи газотранспортних систем: густина, динамічна в'язкість, коефіцієнт стисливості, питома масова ізобарна та ізохорна теплоємність, показник адіабати, коефіцієнт Джоуля-Томсона, швидкість звуку в газі, ентальпія газу, коефіцієнт теплопровідності.

Розрахунок термодинамічних властивостей газу є невід'ємною частиною обліку кількості газу та прогнозуванню режимних параметрів роботи магістрального газопроводу в будь-якій точці профілю траси. В даний час пред'являються все більш жорсткі вимоги до обліку газу [1; 2], виникає необхідність в більш точних методах розрахунку його термодинамічних властивостей. Вчені Ruhr-Universität Bochum (Німеччина) розробили метод розрахунку термодинамічних властивостей газу, заснований на рівнянні стану газу GERG-2008, яке є розширеною моделлю рівняння стану GERG-2004 [4].

Рівняння стану GERG-2008 дозволяє розраховувати термодинамічні властивості газу, що включає один або кілька (до 21) компонентів в будь-якій комбінації. Воно засноване на окремих рівняннях стану для кожного компонента газу і кореляційних рівнянь, розроблених для бінарних сумішей, що складаються з цих компонентів.

Виділяють дві області застосування рівняння стану GERG-2008 – звичайну ("pipeline") і розширену ("expanded").

Звичайна область застосування стосується систем магістрального транспорту, зберігання та розподілу природного газу, та для температури газу діапазон складає $90 \leq T \leq 450 \text{ K}$ та абсолютного тиску $P \leq 35 \text{ МПа}$.

Зазначимо, що розширена невизначеність визначення густини газової фази GERG-2008 по абсолютній величині не перевищує 0,1 %.

У зв'язку зі значним розвитком систем транспортування газу у світі існують різні форми основного рівняння для розрахунку газопроводів (визначення пропускної здатності, розподілу тиску та температури по довжині газопроводу), найвідоміші з яких [5]:

- загальне рівняння для розрахунку газопроводів [6];
- рівняння Веймаута;
- рівняння Панхандля типу *A* та типу *B*;
- рівняння інституту газових технологій (Institute of Gas Technology) із урахуванням модифікованої формули Колбрука;
- рівняння Спитзгласса;
- рівняння Муеллера.

Основним недоліком вказаних рівнянь є те, що вони отримані при інтегруванні рівняння руху газу в припущенні того, що коефіцієнт стисливості газу та температура газу є незмінними по всій довжині газопроводу.

Для отримання основного рівняння газопроводу, що дає змогу врахувати зміну тиску газу по довжині трубопроводу можна представити формулу для розрахунку коефіцієнта стисливості природного газу у вигляді

$$z = 1 - A \cdot p \cdot \Delta^B \cdot T^C, \quad (1)$$

де p , T , Δ – відповідно абсолютний тиск, температура та відносна густина газу за повітрям;

A , B , C – коефіцієнти математичної моделі коефіцієнта стисливості газу, що можуть бути отримані із застосуванням методу найменших квадратів в діапазоні зміни тиску, температури та відносної густини газу за

умов магістрального транспорту із використанням фундаментального рівняння стану GERG-2008.

Залежність (1) є модифікацією формули Касперовича та нормативної формули галузевих норм проектування магістральних газопроводів [7].

Після інтегрування закону збереження механічної енергії по довжині ділянки газопроводу, записаного в диференціальній формі без урахування зміни кінетичної енергії руху газу, та в припущенні ізотермічності потоку газу (температура газу в порівнянні з тиском змінюється незначно), отримано таке рівняння

$$A_M \cdot L + \frac{x_1}{2} \cdot \ln \left[\frac{z_2^2 + B_M \cdot p_2^2}{z_1^2 + B_M \cdot p_1^2} \right] - x_2 \cdot (p_1 - p_2) + \frac{x_3}{\sqrt{B_M}} \cdot \left[\arctg \left(\frac{z_2}{p_2 \cdot \sqrt{B_M}} \right) - \arctg \left(\frac{z_1}{p_1 \cdot \sqrt{B_M}} \right) \right] = 0, \quad (2)$$

де A_M , B_M – коефіцієнти, що є функцією від масової витрати газу в трубопроводі M

$$A_M = \frac{8 \cdot \lambda \cdot M^2 \cdot R \cdot T}{\pi^2 \cdot d^5}; \quad B_M = \frac{g \cdot i_z}{A_M \cdot R \cdot T}, \quad (3)$$

x_1 , x_2 , x_3 – коефіцієнти, що обчислюються за формулою

$$x_1 = \frac{\beta^2 - B_M}{(B_M + \beta^2)^2}; \quad x_2 = \frac{\beta}{B_M + \beta^2}; \quad x_3 = \frac{2 \cdot B_M \cdot \beta}{(B_M + \beta^2)^2}, \quad (4)$$

β – коефіцієнт пропорційності у формулі (1) до величини абсолютного тиску p

$$\beta = A \cdot \Delta^B \cdot T^C, \quad (5)$$

λ – коефіцієнт гідравлічного опору газопроводу, що обчислюється за модифікованою формулою Колбрука із урахуванням фактичної еквівалентної абсолютної шорсткості внутрішньої порожнини газопроводу;

R – питома газова стала природного газу;

d , L – відповідно внутрішній діаметр та геометрична довжина ділянки газопроводу;

T – середня абсолютна температура газу в трубопроводі, що розраховуються із урахуванням ефекту Джоуля-Томсона;

g – прискорення сили тяжіння;

i_2 – геометричний нахил ділянки газопроводу;

z_1 , z_2 , p_1 , p_2 – відповідно коефіцієнт стисливості природного газу та абсолютний тиск газу на початку та в кінці лінійної ділянки газопроводу.

В загальному випадку рівняння (2) є трансцендентним та вимагає застосування методу послідовних наближень для розрахунку масової витрати газу при заданому перепаду тиску. Всі величини, що входять у залежність (2) підставляються в системі одиниць вимірювання SI. Також за допомогою рівняння (2) можна розв'язати і обернену задачу на розрахунок розподілу тиску та температури газу по довжині трубопроводу за відомих значень тиску, температури та продуктивності в початковому перерізі трубопроводу.

Із застосуванням методів математичного моделювання та з використанням рівняння стану GERG-2008 отримано таку залежність для розрахунку коефіцієнта стисливості природного газу за умов магістрального транспорту (всі величини підставляються в SI)

$$z = 1 - 349 \cdot p \cdot \Delta^{1,918} \cdot T^{-3,981}. \quad (6)$$

Залежність (6) отримана для такого діапазону зміни параметрів:

$$1 \text{ МПа} \leq p \leq 10 \text{ МПа}; \quad 250 \text{ К} \leq T \leq 330 \text{ К}; \quad 0,555 \leq \Delta \leq 0,680.$$

Також відносне відхилення коефіцієнта стисливості газу, обчислене за формулою (6) та рівнянням стану GERG-2008 не перевищує 5 % по абсолютній величині.

В подальшому на основі рівняння стану GERG-2008 планується розробити відповідні уточнені математичні моделі для розрахунку ізобарної теплоємності, динамічної в’язкості, коефіцієнта Джоуля-Томсона як функції від абсолютних тиску, температури та відносної густини газу за повітрям.

Висновки

1. З використанням фундаментального рівняння стану природних газів GERG-2008 удосконалено основне рівняння газопроводів, що дає змогу розрахувати пропускну здатність лінійної ділянки магістрального газопроводу із урахуванням профілю траси, фактичного стану внутрішньої порожнини та динаміки зміни тиску і коефіцієнта стисливості газу по довжині трубопроводу.

2. Із застосуванням методу найменших квадратів отримано аналітичну модель для розрахунку коефіцієнта стисливості природного газу за умов магістрального транспорту на основі фундаментального рівняння стану GERG-2008. Ступінь достовірності апроксимації отриманої математичної моделі вищий за 0,99, та не перевищує по абсолютній величині 5 % відносно значень, отриманих за рівнянням стану GERG-2008 за однакових термобаричних умов.

Література

1. Kunz O., Klimeck R., Wagner W., Jaeschke M. The GERG-2004 wide-range equation of state for natural gases and other mixtures; GERG TM15, 2007; Fortschr.-Ber. VDI, Reihe 6, Nr. 557, VDI Verlag: Düsseldorf, 2007. Also available as GERG Technical Monograph 15, 2007.
2. Kunz O., Wagner W. The GERG-2008 Wide-Range Equation of State for Natural Gases and Other Mixtures: An Expansion of GERG-2004 // J. of chemical & engineering data. 2012. № 57. P. 3032–3091. URL: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/je300655b>

3. ISO 20765-1:2005 Natural gas – Calculation of thermodynamic properties – Part 1: Gas phase properties for transmission and distribution applications [Released: 2005].
4. ISO 20765-2:2015. Natural gas – Calculation of thermodynamic properties – Part 2: Single-phase properties (gas, liquid, and dense fluid) for extended ranges of application [Released: 2015].
5. Селезнев В. Е., Алешин В. В., Прялов С. Н. Основы численного моделирования магистральных трубопроводов / Под ред. В. Е. Селезнева. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: МАКС Пресс, 2009. 436 с.
6. Лурье М. В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа / М. В. Лурье. М.: Нефть и газ, 2003. 335 с.
7. Общесоюзные нормы технологического проектирования. Магистральные трубопроводы. Часть I. Газопроводы: ОНТП 51-1-85. – [Введены 1986-01-01]. Москва: Мингазпром, 1985. 95 с.