

Про вплив теплофізичних параметрів на процес руху газу в трубопроводах

Ярослав П'янило¹, Галина П'янило²

¹ д. т. н., Центр математичного моделювання Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, вул. Дудаєва, 15, Львів, Україна, 79005, e-mail: rjanylo@cmm.lviv.ua

² м. н. с., Центр математичного моделювання Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, вул. Дудаєва, 15, Львів, Україна, 79005, e-mail: rjanylo@cmm.lviv.ua

Рух газу в трубопроводі в усталеному режимі моделюється звичайним нелінійним диференціальним рівнянням із розподіленими параметрами, розв'язок якого знаходиться методом Рунге-Кутта. Досліджено вплив температури ґрунту, розподілу температури газу вздовж трубопроводу та коефіцієнта теплопередачі на величину вихідного тиску в трубопроводі. Побудовано алгоритм визначення середнього значення коефіцієнта теплопередачі на основі заміряних даних. Отримані результати апробовано в ході обчислювального експерименту з використанням реальних даних.

Ключові слова: математичні моделі процесу руху газу в трубопроводах, методи розв'язування, диференціальні рівняння з розподіленими параметрами, обчислювальний експеримент.

Вступ. Основним технологічним об'єктом у газовій мережі вважається лінійний трубопровід. На розподіл тиску в ньому суттєво впливає зміна температури вздовж трубопроводу, яка, своєю чергою, залежить від коефіцієнта теплопередачі від газу до ґрунту. Очевидно, що на коефіцієнт теплопередачі впливає оточуюче середовище, в якому перебуває трубопровід. Оскільки трубопроводи мають значні довжини (порядку декількох десятків кілометрів) і контактують із середовищами з суттєво різними теплофізичними властивостями, то під час розв'язування задач транспортування практично неможливо врахувати залежність коефіцієнта теплопередачі від координати. У зв'язку з цим виникає необхідність у визначенні його середнього значення на основі відомих заміряних даних.

Математичний опис фізичних процесів (прямі моделі) зводиться до диференціальних рівнянь (систем диференціальних рівнянь) звичайних або в часткових похідних [1]. При цьому в модель входять параметри процесу, що вивчається, та параметри середовища, в якому проходить процес. Ці параметри можуть визначатися експериментально або на основі побудови інверсних моделей.

Метою роботи є побудова формули, яка дасть можливість на основі заміряних даних визначати середнє значення коефіцієнта теплопередачі від трубопроводу до ґрунту.

1. Визначення впливу коефіцієнта теплопередачі на розподіл тиску в трубопроводі

Процес руху газу в трубопроводі достатньо добре описується диференціальним рівнянням [1]

$$\frac{dp}{\rho} + \alpha d\left(\frac{v^2}{2}\right) + \lambda \frac{v^2}{2} \frac{dx}{D} + gdh = 0. \quad (1)$$

Для замикання цього рівняння необхідно додати рівняння стану

$$p = \rho zRT.$$

Тут α — коефіцієнт Коріоліса (для ламінарного потоку $\alpha = 2$, а для турбулентного — $\alpha = 1,1$); $p = p(x)$ — розподіл тиску вздовж трубопроводу; $h = h(x)$ — крива, що описує відхилення траси газопроводу відносно горизонту; λ — коефіцієнт гідравлічного опору; v — швидкість газу; ρ — густина газу; D — внутрішній діаметр трубопроводу; g — прискорення вільного падіння; z — коефіцієнт стисливості газу; R — газова стала; T — температура газу; x — біжуча координата $x \in [0, L]$, де L — довжина трубопроводу.

Така модель руху газу враховує силу тертя, відхилення траси газопроводу відносно рельєфу, зміну температури газу вздовж трубопроводу та характер руху. Відзначимо, що (1) є рівняння з розподіленими параметрами, де зміна температури газу вздовж трубопроводу задається формулою [2, 3]

$$T(x) = T_{01} + T_{02}e^{-ax}. \quad (2)$$

Тут

$$T_{01} = T_{zp} - T_{00}, \quad T_{02} = T_0 - T_{zp} + T_{00},$$

$$T_{00} = \frac{1}{al} \left[\Delta p \left(D_i - \frac{1}{C_p \rho_0} \right) + \frac{g \Delta h}{C_p} \right], \quad \Delta p = p_0 - p_k, \quad a = \frac{k \pi D}{C_p M},$$

T_{zp} — температура ґрунту, T_0 — температура газу на вході в трубопровід, C_p — теплоємність газу за сталого тиску, p_0 і p_k — значення тисків на вході та виході трубопроводу, Δh — перепад висот на елементарному проміжку трубопроводу dx , D_i — коефіцієнт Джоуля-Томпсона, ($p_A = 0,1033$ МПа, $T_A = 293$ К), k — коефіцієнт теплопередачі від газу до ґрунту, $M = \rho_0 Q_0$ — масовий розхід, ρ_0 — густина газу в стандартних умовах, Q_0 — об'ємна витрата газу в стандартних умовах, а для розрахунку коефіцієнта стисливості z для трубопроводів високого тиску достатньо добрі для практичних розрахунків результати дає формула

$$z = \frac{1}{1 + fp}, \quad (3)$$

$f = [24 - 0,21(T - 273,15)]10^{-4}$, (тиск p вимірюється в атмосферах).

З урахуванням цих залежностей рівняння (1) розв'язуємо методом Рунге-Кутта другого порядку точності

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{\eta_3 p^2 + \eta_2 (zT)^2}{p^2 + \eta_1 zT} \frac{p}{zT}, \quad (4)$$

де

$$\eta_1 = -\frac{\alpha R}{2} \left(\frac{M}{S}\right)^2, \quad \eta_2 = \frac{\lambda R}{2D} \left(\frac{M}{S}\right)^2, \quad \eta_3 = \frac{g\Delta h}{RL},$$

$S = \pi D^2/4$ — площа поперечного перерізу трубопроводу.

Значення впливу температури ґрунту та коефіцієнта теплопередачі досліджувалися з використанням даних для трубопроводу «Союз» на проміжку від компресорної станції Новопокков до компресорної станції Борова, значення яких подано в табл. 1 (T_k — заміряне значення температури газу на виході трубопроводу).

Результати обчислень вихідного тиску на основі заміряних значень тиску на вході трубопроводу для різних температур ґрунту та коефіцієнтів теплопередачі наведено в табл. 2 та 3.

Таблиця 1

Вхідні дані для аналізу впливу параметрів процесу руху газу в трубопроводі на значення вихідного тиску

Дата	КС Новопокков «Союз»: тиск входу	Об'ємна витрата у тис. м ³ /год	КС Борова «Союз»: тиск виходу	ρ_0	T_k	T_0
28.01.2004 00:00	66,8	3516	48,5	0,682	26	40
21.02.2004 10:00	61,5	3282	44,3	0,682	26	40
04.03.2004 12:00	67,2	3513	49,4	0,684	25	40
29.03.2004 02:00	69,9	3429	53,9	0,684	25	40
22.04.2004 12:00	63,8	3071	49,8	0,684	25	40
15.05.2004 18:00	65,7	3099	51,1	0,684	24	40
28.05.2004 06:00	65,1	3354	47,5	0,684	24	40
21.06.2004 18:00	68,3	3364	50,9	0,684	24	40
15.07.2004 20:00	64,3	3197	47,4	0,684	24	40
09.08.2004 08:00	69,0	3365	52,2	0,684	24	40
02.09.2004 16:00	64,7	2725	52,5	0,684	24	40
27.09.2004 08:00	68,0	3438	50,0	0,684	24	40
21.10.2004 16:00	65,7	3140	51,9	0,684	24	40
15.11.2004 06:00	61,9	2661	50,0	0,682	24	40
09.12.2004 18:00	68,2	3601	49,7	0,682	24	40
02.01.2005 20:00	66,7	3581	47,8	0,683	24	40
28.01.2005 00:00	65,1	3506	46,6	0,683	24	40

Таблиця 2

Значення заміряних та обчислених вихідних тисків
для різних значень температури ґрунту

Заміряні значення тиску	Обчислені значення тиску			
	Значення температури ґрунту, К			
	280	290	300	310
48,5	48,631	48,394	48,156	47,917
48,4	48,716	48,479	48,242	48,004
48,4	48,602	48,365	48,128	47,889
48,4	48,536	48,299	48,062	47,824
48,3	48,422	48,185	47,947	47,709

Таблиця 3

Значення заміряних та обчислених вихідних тисків
для різних значень коефіцієнта теплопередачі

Заміряні значення тиску	Обчислені значення тиску			
	Значення коефіцієнта теплопередачі			
	1,1	1,2	1,3	1,5
48,5	48,322	48,359	48,394	48,462
48,4	48,408	48,444	48,479	48,547
48,4	48,293	48,330	48,365	48,433
48,4	48,228	48,264	48,299	48,367
48,3	48,113	48,150	48,185	48,253

Оскільки температура та тиск газу під час його руху в довгих трубопроводах можуть суттєво змінюватися, то це може спричинити зміну інших параметрів процесу руху газу. Результати розрахунків підтверджують необхідність побудови співвідношень для визначення коефіцієнта теплопередачі на основі заміряних даних для кожного трубопроводу зокрема.

2. Визначення коефіцієнта теплопередачі

Залежність розподілу температури від коефіцієнта теплопередачі є нелінійна (див. формулу (2)). Для знаходження цього коефіцієнта можна використати числові методи. Зазначимо, що одночасне використання багатьох числових методів для розрахунку параметрів газотранспортних систем може призвести до значної похибки.

Аналіз формули (2) показує, що визначальний вплив на температуру газу у трубопроводі має температура ґрунту T_{gp} та доданок $(T_0 - T_{gp})e^{-\alpha x}$, тобто

$$T(x) \approx T_{zp} + (T_0 - T_{zp})e^{-ax} \quad (5)$$

(формула Шухова) [1]. Формулу (5) використовуємо для визначення початкового значення коефіцієнта теплопередачі k_0 . Розв'язок рівняння (5) відносно k_0 отримуємо в аналітичному вигляді

$$k_0 = \frac{\rho_0 q_0 C_p}{S_b S_p} \ln \frac{T_0 - T_{zp}}{T_\kappa - T_{zp}}, \quad (6)$$

де T_κ — температура газу на виході з трубопроводу; $S_b = \pi D l$, $S_p = \pi D^2 / 4$. Подамо тепер коефіцієнт теплопередачі як суму

$$k = k_0 + k_1, \quad (7)$$

де k_1 — невідома, мала величина вищого, порівняно зі значенням k_0 , порядку.

Підставимо формулу (7) у співвідношення (2) та розкладемо за малим параметром k_1 , обмежуючися першими двома доданками. У результаті отримуємо

$$\begin{aligned} T_\kappa - T_{zp} - T_1 \exp(-\gamma L k_0) + \frac{T_2}{\gamma k_0} [1 - \exp(-\gamma L k_0)] = \\ = k_1 \left[\frac{T_2}{\gamma k_0^2} - \left(\gamma L T_1 + \frac{T_2 L}{k_0} + \frac{T_2}{\gamma k_0^2} \right) \exp(-\gamma L k_0) \right], \end{aligned} \quad (8)$$

де

$$\gamma = \frac{\pi D S_p}{\rho_0 q_0 C_p}, \quad T_1 = T_0 - T_{zp}, \quad T_{00} = \frac{\Delta p}{a L} \left(D_i - \frac{1}{C_p \rho_0} \right), \quad \Delta p = p_0 - p_k.$$

Формула (8) дає можливість знайти значення параметра k_1 .

Таким чином алгоритм визначення середнього значення коефіцієнта теплопередачі полягає в наступному.

- За формулою (6) обчислюємо початкове наближення коефіцієнта теплопередачі k_0 .
- Маючи значення k_0 , наступний доданок наближення знаходимо за формулою

$$\begin{aligned} k_1 = \left\{ T_\kappa - T_{zp} - T_1 \exp(-\gamma L k_0) + \frac{T_2}{\gamma k_0} [1 - \exp(-\gamma L k_0)] \right\} \times \\ \times \left[\frac{T_2}{\gamma k_0^2} - \left(\gamma L T_1 + \frac{T_2 L}{k_0} + \frac{T_2}{\gamma k_0^2} \right) \exp(-\gamma L k_0) \right]^{-1}. \end{aligned}$$

- Середнє значення коефіцієнта теплопередачі обчислюємо за формулою (8).

3. Обчислювальний експеримент

Апробація формули (8) проводилася на замірних даних трубопроводу, згаданого вище. Результати обчислювального експерименту подано у табл. 4.

Таблиця 4

Значення коефіцієнта теплопередачі k й абсолютної похибки ε відхилення обчисленого значення вихідного тиску від заміряного для різних значень температури ґрунту T_{gp} та температури газу T_k на виході з трубопроводу

Дата	$T_{gp} = 0, T_k = 20$		$T_{gp} = 5, T_k = 20$		$T_{gp} = 15, T_k = 20$		$T_{gp} = 5, T_k = 15$	
	k	ε	k	ε	k	ε	k	ε
28.01.2004 00:00	1,2134	- 1,024	1,4943	- 0,924	2,8851	- 0,527	2,2092	- 0,702
21.02.2004 10:00	1,1326	- 1,067	1,3948	- 0,969	2,6930	- 0,585	2,0621	- 0,754
04.03.2004 12:00	1,2160	- 1,389	1,4975	- 1,290	2,8912	- 0,897	2,2139	- 1,070
29.03.2004 02:00	1,1868	- 1,196	1,4616	- 1,108	2,8219	- 0,756	2,1608	- 0,911
22.04.2004 12:00	1,0629	- 1,185	1,3089	- 1,104	2,5271	- 0,785	1,9351	- 0,924
15.05.2004 18:00	1,0726	- 0,302	1,3209	- 0,222	2,5502	0,090	1,9528	- 0,047
28.05.2004 06:00	1,1609	- 0,436	1,4297	- 0,342	2,7604	0,031	2,1137	- 0,133
21.06.2004 18:00	1,1644	0,402	1,4339	0,491	2,7686	0,841	2,1200	0,687
15.07.2004 20:00	1,1066	0,451	1,3627	0,538	2,6311	0,881	2,0147	0,731
09.08.2004 08:00	1,1647	0,025	1,4343	0,112	2,7693	0,457	2,1205	0,305
02.09.2004 16:00	0,9431	0,731	1,1614	0,795	2,2422	1,041	1,7170	0,935
27.09.2004 08:00	1,1900	0,036	1,4655	0,128	2,8295	0,497	2,1666	0,335
21.10.2004 16:00	1,0867	- 1,545	1,3383	- 1,463	2,5838	- 1,143	1,9786	- 1,283
15.11.2004 06:00	0,9181	0,417	1,1307	0,482	2,1830	0,728	1,6716	0,622
09.12.2004 18:00	1,2427	- 1,329	1,5304	- 1,228	2,9549	- 0,823	2,2626	- 1,002
02.01.2005 20:00	1,2377	- 1,341	1,5242	- 1,237	2,9429	- 0,822	2,2534	- 1,005
28.01.2005 00:00	1,2118	- 1,450	1,4923	- 1,347	2,8812	- 0,935	2,2062	- 1,116
Середні значення	1,1392		1,4029		2,7087		2,0741	

Висновки. Отримані результати підтверджують суттєвий вплив температури та коефіцієнта теплопередачі на параметри режиму руху газу та свідчать про необхідність побудови співвідношень для визначення коефіцієнта теплопередачі на основі заміряних даних для кожного трубопроводу.

Бачимо, що температура ґрунту та коефіцієнт теплопередачі від газу до ґрунту мають значний вплив на розподіл тиску вздовж трубопроводу й існують такі значення згаданих вище параметрів, за яких абсолютні відхилення обчислених значень тиску від заміряних є найменшими.

Проведений обчислювальний експеримент на основі побудованого алгоритму показує, що формула (6) дає достатньо точні для практики значення коефіцієнта теплопередачі та може бути використана для його визначення на основі заміряних даних.

Література

- [1] Александров, А. В. Проектирование и эксплуатация систем дальнего транспорта газа / А. В. Александров, Е. И. Яковлев. — Москва: Недра, 1974. — 432 с.
- [2] Аналіз впливу гідравлічних параметрів на процес течіння газу в лінійних трубопроводах / О. Михалевич, Я. П'янило, М. Притула, Г. П'янило // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету. — 2004. — № 1(7). — С. 78-85.
- [3] Вплив сил тертя на розподіл температури газових потоків та склад газу / М. Г. Химко, В. А. Фролов, С. В. Гладун та ін. // Нафтова і газова промисловість. — 2005. — № 5. — С. 56-58.

On the influence of thermophysical parameters on the process of gas motion in pipelines

Yaroslav Pyanylo, Galina Pyanylo

The process of flow of gas in a pipeline is designed usual nonlinear differential equalization with the up-diffused parameters, a decision of which is the method of Runge-Kutta. Influence of temperature of soil is investigational, distributing of gas temperature on length of pipeline and coefficient of heat emission on the value of output pressure in a pipeline. The algorithm of determination of mean value of coefficient of heat emission is built on the basis of these measurings. The got results are approved during a numeral experiment on the real information.

О влиянии теплофизических параметров на процесс движения газа в трубопроводах

Ярослав Пяныло, Галина Пяныло

Процесс течения газа в трубопроводе моделируется обыкновенным нелинейным дифференциальным уравнением с распределенными параметрами, решение которого находится методом Рунге-Кутты. Исследовано влияние температуры почвы, распределение температуры газа вдоль трубопровода и коэффициента теплоотдачи на значение выходного давления в трубопроводе. Построен алгоритм определения среднего значения коэффициента теплоотдачи на основании данных измерений. Полученные результаты апробированы в ходе численного эксперимента на реальных данных.

Представлено професором Б. Герою

Отримано 26.01.09