

УДК 622.691.4.01

ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕПЛОВИХ І ГІДРАВЛІЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ГАЗОПРОВОДІВ

¹І.А.Гордієнко, ²Л.М.Заміховський

¹ДП «Укртрансгаз», 01021, Київ-21, Кловський узвіз, 9/1, тел.(044) 4612055,

e-mail: atmmetr.utg@naftogas.net

²ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 48000;

e-mail: ktsu@nung.edu.ua

Рассматриваются вопросы прогнозирования тепловых и гидравлических режимов работы газопроводов. Реализовано итерационную процедуру нахождения коэффициентов гидравлического сопротивления и теплопередачи. Проведен анализ результатов практических расчетов, который выявил повышение точности решения задачи по сравнению с существующими методиками.

The question of gas-pipeline's heat and hydraulic regime's prediction is considered. The iterative procedure for the definition of the hydraulic resistance and heat-transfer coefficients is realized, the analysis of the practical calculations is made, it showed the increasing of the problem's solution accuracy in comparison with the existing methods.

Транспортування недостатньо осушеного газу призводить до конденсації вологи та гідратоутворення в газопроводах. У зв'язку з необхідністю попередження цих процесів виникає проблема підвищення точності прогнозу теплових і гідравлічних режимів, а також умов конденсації вологи та гідратоутворення.

Існуючі методи визначення розподілу температури і тиску газу по довжині газопроводу дають змогу оцінити вказані величини із значним рівнем похибки. Використання математичної моделі течії газу в трубопроводі дає можливість підвищити точність прогнозних розрахунків теплових і гідравлічних режимів газопроводів. В роботі [1] одержано уточнені залежності для розподілу температур і тисків газопроводу у випадку неізотермічних течій

$$T(x) = T_H \left\{ 1 - \left(1 - e^{-Ax} \right) \left(1 - \frac{T^*}{T_H} \right) - \frac{BRT_H}{2C_{pH}} \frac{\partial Z}{\partial T} \int_0^x \frac{e^{-A(x-x')}}{1 - Bx'} dx' \right\}; \quad (1)$$

$$p(x) = p_H \sqrt{1 - Bx} + p_H \frac{B}{2\sqrt{1 - Bx}} \times \left(1 + \frac{T_H}{Z_H} \frac{\partial Z}{\partial T} \right) \left\{ \left(1 - \frac{T^*}{T_H} \right) \left(x - \frac{1 - e^{-Ax}}{A} \right) - \frac{RT_H}{2C_p A} \frac{\partial Z}{\partial T} \left[\ln(1 - Bx) + B \int_0^x \frac{e^{-A(x-x')}}{1 - Bx'} dx' \right] \right\} + \frac{p_H^2}{3Z_H} \frac{\partial Z}{\partial p} \left[1 - Bx - \frac{1 - 1,5Bx}{\sqrt{1 - Bx}} \right], \quad (2)$$

де

$$A = \frac{\alpha \pi D}{GC_p}; \quad B = \frac{16\lambda RT_H G^2 Z_H}{\pi^2 D_B^5 p_H^2}. \quad (3)$$

В рівняннях (1), (2) і (3) використані такі позначення: x – відстань від початку трубопроводу; T^* – температура зовнішнього середовища; T_H – температура на початку ділянки трубопроводу; R – газова стала; C_p – теплоємність газу; Z – коефіцієнт стисливості; p_H – тиск на початку перегону; $Z_H = Z(p_H, T_H)$; $C_{pH} = C_p(p_H, T_H)$; D – зовнішній діаметр; D_B – внутрішній діаметр; G – масова витрата; α – коефіцієнт теплопередачі; λ – коефіцієнт гідравлічного опору.

Для використання формул (1) і (2) в практичних розрахунках необхідно визначити коефіцієнти α і λ . Для цього проводиться вимірювання тиску та температури на початку і в кінці досліджуваної ділянки газопроводу. Якщо $T(x=L) = T_K$, $p(x=L) = p_K$, то, підставляючи вказані значення в (1), (2), одержується система нелінійних алгебраїчних рівнянь відносно двох невідомих величин A та B , які пов'язані з α і λ співвідношенням (3).

В роботі [1] запропоновано для розв'язку вказаної системи визначити значення коефіцієнта B в нульовому наближенні з рівняння для тиску за формулою

$$B_0 = \frac{1}{L} \left(1 - \frac{p_k^2}{p_H^2} \right). \quad (4)$$

Тоді A визначається з рівняння для температури.

Реалізація вказаної процедури, що містить рівняння (1)-(3), передбачає використання числових методів через нелінійність рівнянь одержаної системи. В роботі [2] розроблено такий алгоритм розрахунку вказаних параметрів: задаються початкові наближення значень A_0 та

B_0 , після чого будується ітераційна процедура. З рівняння (1)

де початкові наближення A_0 та B_0 задаються як теоретичні значення відповідних коефіцієнтів.

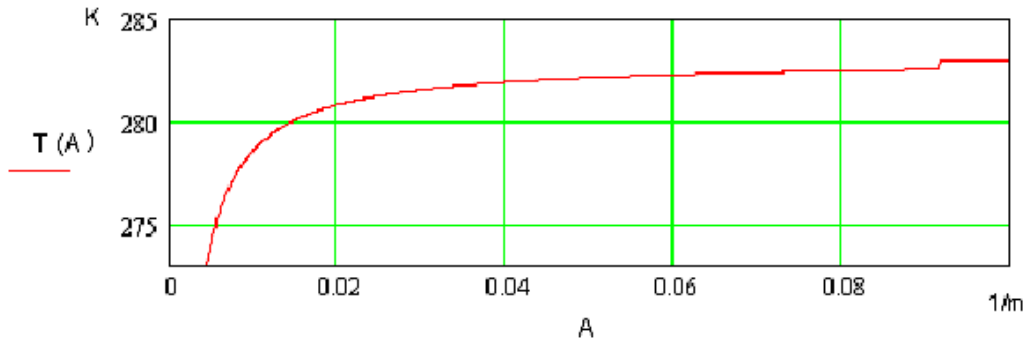


Рисунок 1 – Залежність температури кінця ділянки від коефіцієнта A при нульовому наближенні коефіцієнта B

$$F_1(A, B) = K_3 + K_2 e^{-AL} - BK_1 \cdot \int_0^L \frac{e^{-A(L-x')}}{1-Bx'} dx' = 0, \quad (5)$$

де

$$K_1 = \frac{KT_H^2}{2C_p} \left(\frac{\partial Z}{\partial T} \right); \quad K_2 = T_H - T^*; \quad K_3 = T^* - T_K, \quad (2):$$

$$F_2(A, B) = K_4 \sqrt{1-BL} + \frac{K_5 B}{\sqrt{1-BX}} \times \left\{ K_6 - K_7 \frac{1-e^{-AL}}{A} - \frac{1}{A} K_8 \ln(1-BL) + B \int_0^L \frac{e^{-A(L-x')}}{1-Bx'} dx' \right\} + \quad (6)$$

$$K_9 \left(1 - BL - \frac{1-1,5BL}{\sqrt{1-BL}} \right) - p_K = 0,$$

де

$$K_4 = p_H; \quad K_5 = \frac{p_H}{2} \left(1 + \frac{T_H}{Z_H} \frac{\partial Z}{\partial T} \right);$$

$$K_6 = \left(1 - \frac{T^*}{T_H} \right) L; \quad K_7 = 1 - \frac{T^*}{T_H};$$

$$K_8 = \frac{RT_H}{2C_p} \frac{\partial Z}{\partial T}; \quad K_9 = \frac{p_H^2}{3Z_H} \frac{\partial Z}{\partial p}.$$

Для побудови ітераційної процедури, метою якої є знаходження параметрів A та B з системи (5), (6), використовуємо гібридний ітераційний метод, в якому зовнішні ітерації беруться за Зейделем [3], а внутрішні — за Ньютоном,

$$\begin{cases} \frac{\partial F_1}{\partial A}(A_k, B_k)(A_{k+1} - A_k) + F_1(A_k, B_k) = 0, \\ \frac{\partial F_2}{\partial B}(A_{k+1}, B_k)(B_{k+1} - B_k) + F_2(A_{k+1}, B_k) = 0, \end{cases} \quad (7)$$

Такий спосіб побудови початкового наближення сприяє тому, що у випадку, коли відповідна система нелінійних рівнянь має багато коренів, запропонована ітераційна процедура дозволяє знайти саме ту пару коренів, яка відповідає реальній фізичній картині процесу.

Проведено тестові розрахунки для порівняння результатів визначення температури і тичку за двома методами розрахунків. Згідно з роботою [1] в нульовому наближенні значення коефіцієнта B_0 за формулою (4) становить $3,048 \cdot 10^{-6}$ при таких вхідних даних: $L = 142,7$ км – довжина ділянки трубопроводу, що розглядається; $p_k = 5,48$ МПа – тиск в кінці ділянки; $p_H = 7,29$ МПа – тиск на початку перегону. Графічна залежність функції визначення температури від коефіцієнта A при визначеному значенні B_0 наведена на рисунку 1.

При відомому значенні температури в кінці ділянки трубопроводу з рівняння (1) визначено значення шуканого параметра A . Вихідні дані, що застосовуються для проведення вказаного розрахунку такі:

$T_H = 313$ К – температура на початку ділянки;

$C_p = 2,701$ кДж/(кг*К) – теплоємність газу при орієнтовному середньому значенні температури $T_{cp} = 301,9$ К і середньому значенні тиску $p_{cp} = 6,428$ МПа на перегоні. Дане значення визначено з відомої залежності (8)

$$C_p = 1,695 + 0,001838 \cdot T_{cp} + 1,96 \cdot 10^6 \cdot \frac{(p_{cp} - 0,1)}{T_{cp}^3}; \quad (8)$$

$T_{серед} = 283$ К – температура навколишнього середовища. При підземному укладанні газопроводу температурою навколишнього середовища є температура ґрунту на глибині укладання труби;

$T_k = 293,426$ К – температура в кінці ділянки;

$Z_H(T_{3в}, p_{3в}) = 0,901$ – значення коефіцієнта стисливості газу, визначене як функція від зведених значень тиску і температури газу за

розрахунки проводились в програмному середовищі MathCad 2001.

Аналіз одержаних розрахунків проведено з використанням знайдених коефіцієнтів прогно-

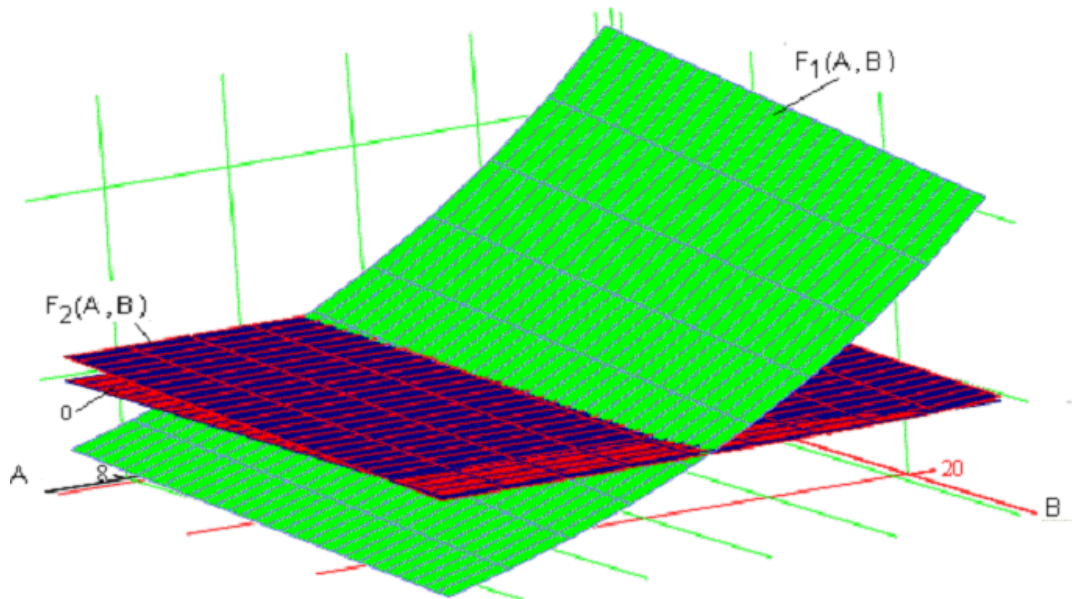


Рисунок 2 — Множина значень функцій $F_1(A,B)$ і $F_2(A,B)$

формулою

$$Z_H(T_{3в}, p_{3в}) = 1 - \frac{0,0241 \cdot p_{3в}}{1 - 1,68 \cdot T_{3в} + 0,78 \cdot T_{3в}^2 + 0,0107 \cdot T_{3в}^3} \quad (9)$$

де: $p_{3в} = \frac{p_{cp}}{p_{нк}}$; $T_{3в} = \frac{T_{cp}}{T_{нк}}$; $p_{3в} = 1,397$ МПа; $T_{3в} = 1,585$ К; $p_{нк} = 4,60$ МПа – псевдокритичний тиск газу; $T_{нк} = 190,5$ К – псевдокритична температура газу; $\partial Z / \partial T = 0,256$ і $\partial Z / \partial p = -0,071$ – значення похідних коефіцієнта стисливості газу за зведеними значеннями температури і тиску.

Одержане значення коефіцієнта A при вказаних вихідних даних становить $0,00424 \text{ м}^{-1}$.

Реалізація ітераційної процедури, запропонованої в роботі [2], дає змогу уточнити теоретичні значення коефіцієнтів A і B . В якості початкових наближень коефіцієнтів використано значення, одержані з реалізації алгоритму роботи [1]. Критерієм зупинки ітераційної процедури є рівність нулю відповідно функцій $F_1(A,B)$ і $F_2(A,B)$ (рисунок 2).

Результатом виконання ітераційної процедури є знайдені значення коефіцієнтів $A = 5,738094 \cdot 10^{-3}$ і $B = 3,542498 \cdot 10^{-6}$, кількість ітерацій $n = 10$. Значення нев'язок $F_1(A,B)$ і $F_2(A,B)$ при визначених значеннях A і B становлять 0, тобто вдається досягти абсолютно точного результату. За необхідності забезпечити меншу точність визначення значень допускається встановлення необхідного значення похибки в ітераційній процедурі. Всі

зом значення температури і тиску на відстані L від початку ділянки трубопроводу. Згідно з визначеними коефіцієнтами з роботи [1] із вказаними раніше параметрами значення температури становитиме $296,732$ К, а значення тиску — $5,776$ МПа. При цьому величина абсолютної похибки визначення відповідних показників становить $3,306$ К по температурі і $0,296$ МПа по тиску. Використання значень коефіцієнтів, визначених запропонованим в даній роботі ітеративним методом дає змогу зменшити похибки визначення до $1,645 \cdot 10^{-4}$ К і 0 МПа відповідно.

Отже, реалізація запропонованої ітераційної процедури дає можливість звести до мінімуму похибку визначення значень коефіцієнтів A і B і визначати з необхідним рівнем точності значення тиску та температури на заданій відстані від початку трубопроводу.

Література

1. Брук В.А. Визначення режимів роботи та гідравлічної ефективності газопроводу у випадку неізотермічних течій // Питання розвитку газової промисловості України. – Харків, 2002. – С. 8-18.
2. Гордієнко І.А. Методика розрахунку теплових та гідравлічних режимів з метою попередження гідратуутворення в газопроводах // "Наукові вісті" ІМЕ "Галицька академія". – 2003. – № 2(4). – С. 174-181.
3. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. – М.: Наука, 1989. – 432 с.