

## ОЦІНКА ВПЛИВУ ДОВКІЛЛЯ НА ТОЧНІСТЬ ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНОГО РОЗРАХУНКУ ГАЗОПРОВОДУ

В. Б. Михалків<sup>1</sup>, О. В. Михалків<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ІФНТУНГ; вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019.  
e-mail: tzng@nung.edu.ua

<sup>2</sup> РВУ «Львівавтогаз» АГНКС Івано-Франківськ: с. Чернів, Тисменицький р-н,  
Івано-Франківська обл.  
e-mail: Alex\_Mikhalkiv@mail.ru

*При розрахунках теплових режимів роботи магістральних газопроводів для врахування впливу оточуючого середовища використовують поняття повного коефіцієнта теплопередачі від газу в довкілля. Розрахувати даний коефіцієнт для конкретного газопроводу практично неможливо з-за великої протяжності газопроводу з різними теплофізичними властивостями ґрунтів. На практиці коефіцієнт теплопередачі задається наближеним значенням або визначається з обернених задач. Тому виникає проблема оцінки впливу похибки визначення коефіцієнта теплопередачі на точність теплогідрравлічного розрахунку.*

Ключові слова: Газопровід, тепловий режим, коефіцієнт теплопередачі, похибка.

*При расчетах тепловых режимов магистральных газопроводов для учета влияния окружающей среды используют понятие общего коэффициента теплопередачи от газа в грунт. Рассчитать данный коэффициент для конкретного газопровода практически невозможно из-за большой протяженности газопровода с разными теплофизическими свойствами грунтов. На практике коэффициент теплопередачи задается приближительным значением или определяется из решения обратных задач. Поэтому возникает проблема оценки влияния ошибки определения коэффициента теплопередачи на точность теплогидравлического расчета.*

Ключевые слова: Газопровод, тепловой режим, коэффициент теплопередачи, погрешность.

*In the calculations of thermal regimes of gas pipelines into account the effect of the environment is used the term "overall heat transfer coefficient" from the gas in the ground. The calculation this coefficient for a specific pipeline is almost impossible because of the great length of the pipeline with different thermal properties of soils. In practice, the heat transfer coefficient is given by an average value, or determined from the solution of inverse problems. Therefore there is the problem of assessing the effect of errors in the determination of heat transfer coefficient on the accuracy of thermal-hydraulic calculation*

Key words: Gas pipelines, thermal regime, the term transfer coefficient, mistake.

Температурний режим ділянки визначається рядом чинників: теплообміном з навколишнім середовищем, розширенням газу і силами тертя в потоці газу. Енергія витрачається на подолання сил тертя при русі газу повертається йому підвищенням температури. Компенсація роботи тертя теплотою, що виділяється при цьому, є внутрішнім процесом, що ніяк зовні себе не проявляє. Нехтуючи зміною кінетичної енергії газу можна вважати, що тертя не впливає на зміну температури газу в газопроводі.

У процесі експлуатації коефіцієнт теплопередачі визначають на основі вимірів зміни температур газу в газопроводі по довжині і в часі.

Тому постає питання впливу точності визначення коефіцієнта теплопередачі від газу в довкілля на теплогідрравлічний розрахунок.

Температурний режим газопроводу визначає розподіл температур по його довжині. Для розрахунку температурного режиму вихідним рівнянням є рівняння першого початку термодинаміки [1]:

$$dQ = dU + dL, \quad (1)$$

де  $d$  – підвід тепла;  $dU$  – зміна внутрішньої енергії;  $dL$  – робота, виконувана газом.

Слід зазначити, що підвід тепла можна розглядати як зовнішній і внутрішній:

$$dQ = dQ_{\text{зовн}} + dQ_{\text{внут}}, \quad (2)$$

де  $dQ_{\text{зовн}}$  – зовнішній теплообмін, що полягає в теплообміні з навколишнім середовищем через стінку;  $dQ_{\text{внут}}$  – внутрішній теплообмін, що полягає в підігріві газу за рахунок роботи сил тертя.

Робота  $dL$  може бути записана:

$$dL = p dv. \quad (3)$$

З погляду математики

$$d(pv) = p dv + v dp. \quad (4)$$

Звідси

$$dL = d(pv) = d(pv) - v dp = d\left(\frac{p}{\rho}\right) - \frac{dp}{\rho}, \quad (5)$$

де  $v = \frac{1}{\rho}$  – питомий об'єм (величина, зворотна густині).

Запишемо рівняння енергії в диференціальній формі:

$$U_1 + \frac{P_1}{\rho} + \frac{\omega_1^2}{2} = U_2 + \frac{P_2}{\rho} + \frac{\omega_2^2}{2} - q \pm L, \quad (6)$$

$$dU + \frac{dP}{\rho} + d\left(\frac{\omega^2}{2}\right) - dq \pm dL = 0, \quad (7)$$

$$\frac{dP}{\rho} + d\left(\frac{\omega^2}{2}\right) \pm dL = 0. \quad (8)$$

Зміна внутрішньої енергії  $dU$  здійснюється за рахунок підведення тепла  $dq$ , тому обидва члени можна опустити.

Зміною швидкісного напору  $d\left(\frac{\omega^2}{2}\right)$  нехтуємо як складовою вишого порядку малості:

$$-\frac{dP}{\rho} = dL_{\text{тер}} - \text{робота сил тертя.}$$

Підставимо результат у (1)

$$dQ_{\text{зовн}} + dQ_{\text{внут}} = dU + d\left(\frac{P}{\rho}\right) + dL_{\text{тер}}. \quad (9)$$

Робота сил тертя перетворюється в тепло, тому

$$dQ_{\text{внут}} = dL_{\text{тер}}, \quad (10)$$

$$dQ_{\text{зовн}} = dU + d\left(\frac{P}{\rho}\right). \quad (11)$$

Теплообмін може бути записаний на підставі закону теплопередачі Ньютона:

$$Q = kF(t - t_{\text{зовн}})t, \quad (12)$$

де  $F = \pi d_{\text{зовн}} dx$  - площа поверхні теплопередачі,

$$dQ_{\text{внут}} = \frac{k\pi D}{M}(T - T_0)dx, \quad (13)$$

де  $M$  – масова витрата газу.

Відповідно до правила диференціювання сум маємо:

$$dU + d\left(\frac{P}{\rho}\right) = d\left(U + \frac{P}{\rho}\right) = di. \quad (14)$$

$$\text{Тому } \frac{k\pi D}{M}(T - T_0)dx = di. [2]$$

Ентальпія є функція двох змінних (тиску і температури)  $i = i(P, T)$ . Оскільки ентальпія є функцією двох змінних, то її повний диференціал запишеться в такому вигляді:

$$di = \left(\frac{\partial i}{\partial T}\right)_P \cdot dT + \left(\frac{\partial i}{\partial P}\right)_T \cdot dP. \quad (15)$$

З'ясуємо фізичний зміст похідних  $\left(\frac{\partial i}{\partial T}\right)_P$  і  $\left(\frac{\partial i}{\partial P}\right)_T$ .

Очевидно,  $\left(\frac{\partial i}{\partial T}\right)_P = C_P$  – ізобарна теплоємність.

Щоб знайти природу другої похідної  $\left(\frac{\partial i}{\partial P}\right)_T$  розглянемо ізоентальпійний процес  $di = 0$ .

Тоді

$$\left(\frac{\partial i}{\partial T}\right)_P \cdot dT + \left(\frac{\partial i}{\partial P}\right)_T \cdot dP = 0.$$

Звідси:

$$\left(\frac{\partial i}{\partial P}\right)_T = -\left(\frac{\partial i}{\partial T}\right)_P \cdot \left(\frac{dT}{dP}\right)_i,$$

$$\left(\frac{\partial i}{\partial P}\right)_T = -c_p \cdot \left(\frac{dT}{dP}\right)_i = C_p \cdot D_i, \quad (16)$$

де  $D_i$  – коефіцієнт ефекту Джоуля-Томсона.

$$\frac{k\pi D}{M}(T - T_0)dx = C_p dT - C_p D_i dP. \quad (17)$$

Позначимо  $\frac{k\pi D}{MC_p} = a$ , тоді:

$$\frac{dT}{dx} - D_i \frac{dP}{dx} = a(T - T_0). \quad (18)$$

Щоб розв'язати це рівняння, необхідно знати похідну  $\frac{dP}{dx}$ . Знайдемо її, використовуючи рівняння депресії тиску [3]:

$$\frac{dP}{dx} = \frac{d}{dx} \left( \sqrt{P_{\Pi}^2 - (P_{\Pi}^2 - P_{\kappa}^2) \frac{x}{L}} \right) = \frac{1}{2L} \frac{P_{\Pi}^2 - P_{\kappa}^2}{\sqrt{P_{\Pi}^2 - (P_{\Pi}^2 - P_{\kappa}^2) \frac{x}{L}}}. \quad (19)$$

Тоді

$$\frac{dT}{dx} = \frac{D_i}{2L} \frac{P_{\Pi}^2 - P_{\kappa}^2}{\sqrt{P_{\Pi}^2 - (P_{\Pi}^2 - P_{\kappa}^2) \frac{x}{L}}} = a(T - T_0). \quad (20)$$

Прийнявши  $\frac{dP}{dx}$  постійною величиною, після інтеграції в межах  $x$  від 0 до  $x$  і  $T$  від  $T_1$  до  $T$ , отримуємо:

$$\frac{1}{a} \ln \frac{a \cdot (T - T_0) - D_i \cdot \frac{dP}{dx}}{a \cdot (T_1 - T_0) - D_i \cdot \frac{dP}{dx}} = -x, \quad (21)$$

звідки

$$\frac{a \cdot (T - T_0) - D_i \cdot \frac{dP}{dx}}{a \cdot (T_1 - T_0) - D_i \cdot \frac{dP}{dx}} = e^{-a \cdot x}, \quad (22)$$

де  $T_1$  - температура газу на початку ділянки, град.

Прийнявши  $\frac{dP}{dx} = \frac{P_1^2 - P_2^2}{2 \cdot P_{cp} \cdot l}$ , отримуємо рівняння ВНДІГАЗУ для визначення температури в будь-якій точці ділянки МГ

$$T_x = T_0 + (T_1 - T_0) \cdot e^{-a \cdot x} - D_i \frac{P_1^2 - P_2^2}{2 \cdot a \cdot P_{cp} \cdot x} (1 - e^{-a \cdot x}). \quad (23)$$

При  $D_i = 0$  рівняння (23) переходить в рівняння Г.В. Шухова

$$T_x = T_0 + (T_1 - T_0) \cdot e^{-a \cdot x}. \quad (24)$$

Порівнюючи (23) і (24) бачимо, що за рівнянням ВНДІГАЗУ температура газу завжди менша, ніж за рівнянням Шухова на величину

$$\Delta T_{op} = D_i \frac{P_1^2 - P_2^2}{2 \cdot a \cdot P_{cp} \cdot x} (1 - e^{-a \cdot x}).$$

Отже, температура газу до кінця ділянки може досягати значень менших ніж температура ґрунту. В кінці ділянки температура газу може бути нижче за температуру ґрунту на  $\Delta T_{op}$ , яка може складати (3...5) °С.

Середня температура газу в ділянці визначається як середньгеометрична величина

$$T_{cp} = T_0 + (T_1 - T_0) \cdot \frac{1 - e^{-a \cdot l}}{a \cdot l} - D_i \frac{P_1^2 - P_2^2}{2 \cdot a \cdot P_{cp} \cdot l} \left[ 1 - \frac{1}{a \cdot l} (1 - e^{-a \cdot l}) \right]. \quad (25)$$

При розрахунку ділянки МГ значення тиску і температури газу в кінці ділянки найчастіше бувають невідомі, і для визначення середніх значень ними доводиться задаватися орієнтування. В цьому випадку величину середньої температури газу в ділянці можна визначити, приблизно використовуючи залежність

$$T_{cp} = \frac{1}{3} T_1 + \frac{2}{3} T_2, \quad (26)$$

де  $T_2$  - температура газу в кінці ділянки, К.

Орієнтовне значення  $k = 1,5 \dots 2,0$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Оцінимо вплив коефіцієнта теплопередачі на величину кінцевої і середньої температури газу в ділянці.

Для цього розробимо програму розрахунку.

Задаємося властивостями газу, витратою газу, початковими тиском і температурою газу та температурою ґрунту.

Оцінку проведемо на прикладі ділянки МГ діаметром 1400×20 мм і завдовжки 100 км. Продуктивність газопроводу 90 млн. м<sup>3</sup> в добу при початкових значеннях температури  $T_1 = 300$  К і тиску  $P_1 = 7,39$  МПа. Температура ґрунту  $T_0 = 273$  К. Відносна густина газу  $\Delta = 0,56$ . Коефіцієнт теплопередачі  $1$  Вт/(м<sup>2</sup>·К).

В першому наближенні  $P_{cp} = P_1$ ,  $T_{cp} = T_1$ .

Знаходимо теплоємність газу на ділянці за формулою [4]

$$C_p = 1,696 + 1,838 \cdot 10^{-3} \cdot T_{cp} + 1,96 \cdot 10^6 \frac{P_{cp} - 0,1}{T_{cp}^3}.$$

Знаходимо коефіцієнт Джоуля-Томсона на ділянці за формулою [4]

$$D_i = \frac{1}{C_p} \left( \frac{0,98 \cdot 10^6}{T_{cp}^2} - 1,5 \right).$$

Визначаємо масову витрату газу за формулою

$$M = \frac{Q \cdot 10^6 \cdot \Delta \cdot 1,293}{24 \cdot 3600}.$$

Знаходимо коефіцієнт Шухова  $a$ .

Визначаємо режим руху газу по газопроводу через критерій Рейнольдса

$$Re = 17,75 \cdot 10^3 \frac{Q \cdot \Delta}{D \cdot \eta},$$

де  $D$  – внутрішній діаметр газопроводу, мм;  $\eta$  – коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с.

Коефіцієнт гідравлічного опору визначається за формулою Альтшуля:

$$\lambda = 0,067 \left( \frac{158}{Re} + \frac{2 \cdot k_e}{D} \right)^{0,2},$$

де  $k_e$  – еквівалентна шорсткість труб, для нових сталевих труб  $k_e = 0,03$  мм.

В цьому випадку рівняння пропускної здатності ділянки прийме наступний вигляд [4]:

$$Q = k_g \cdot Q_0 = k_g \cdot c \cdot \sqrt{\frac{(P_1^2 - P_2^2) \cdot D_0^5}{\lambda_0 \cdot \Delta \cdot z \cdot T \cdot l}}, \quad (27)$$

де  $c$  – коефіцієнт, що залежить від вибору системи одиниць;  $P_1$  і  $P_2$  – тиск газу на початку і в кінці ділянки відповідно;  $\Delta$  – відносна густина газу до повітря;  $z$  – середній коефіцієнт стисливості газу;  $T$  – середня температура газу на ділянці газопроводу;  $l$  – довжина ділянки газопроводу.

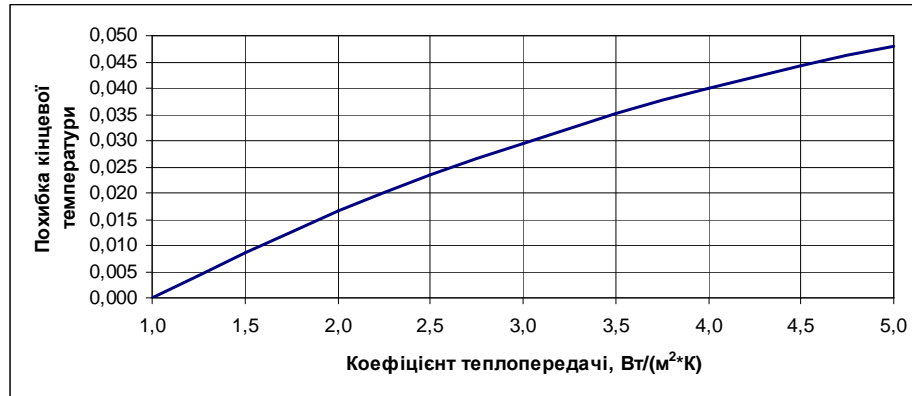
За формулами (23) та (25) знаходимо кінцеву і середню температуру газу в ділянці газопроводу, відповідно.

Уточнюємо середній тиск на ділянці газопроводу

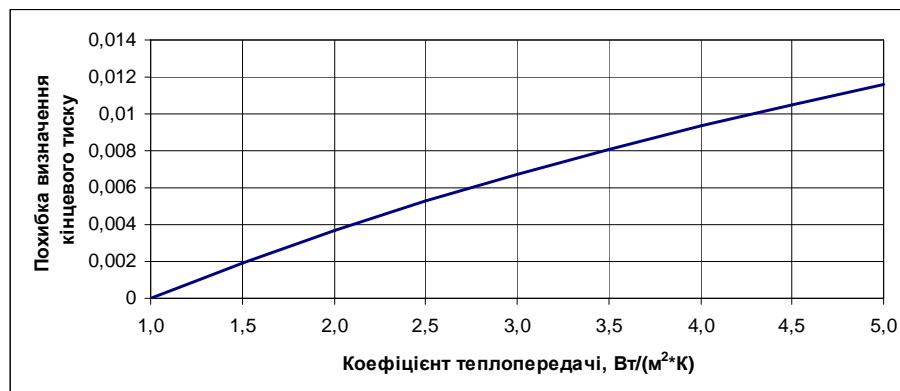
$$P_{cp} = \frac{2}{3} \left( P_1 + \frac{P_2^2}{P_1 + P_2} \right).$$

Далі проводимо розрахунок у другому наближенні і так далі.

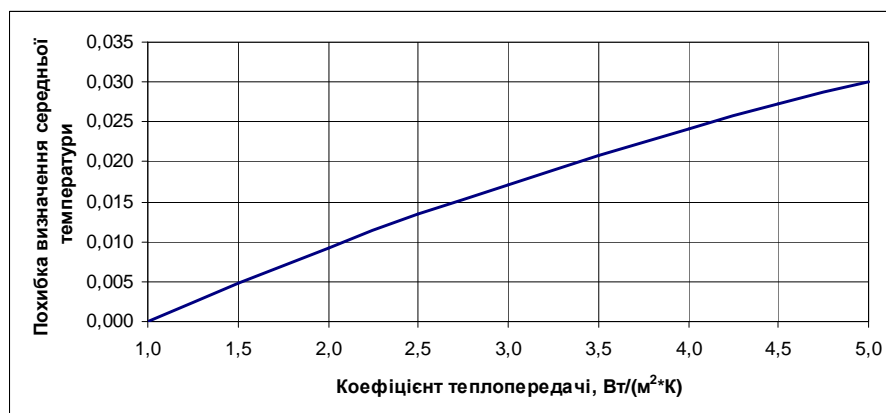
Для розрахунку режимів роботи і визначення впливу коефіцієнта теплопередачі від газу в ґрунт на режим роботи газопроводу розроблена програма в середовищі Excel. Результати розрахунків у вигляді графіків подані на рисунках 1... 6.



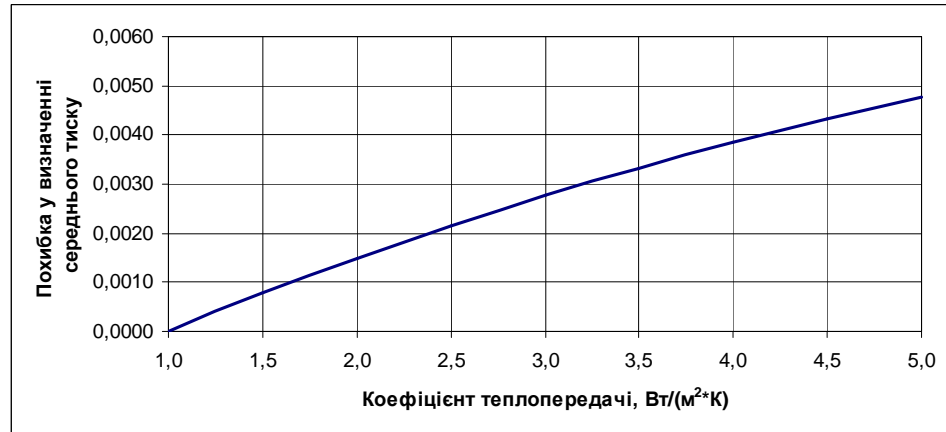
**Рисунок 1 – Залежність похибки у визначенні кінцевої температури від коефіцієнта теплопередачі**



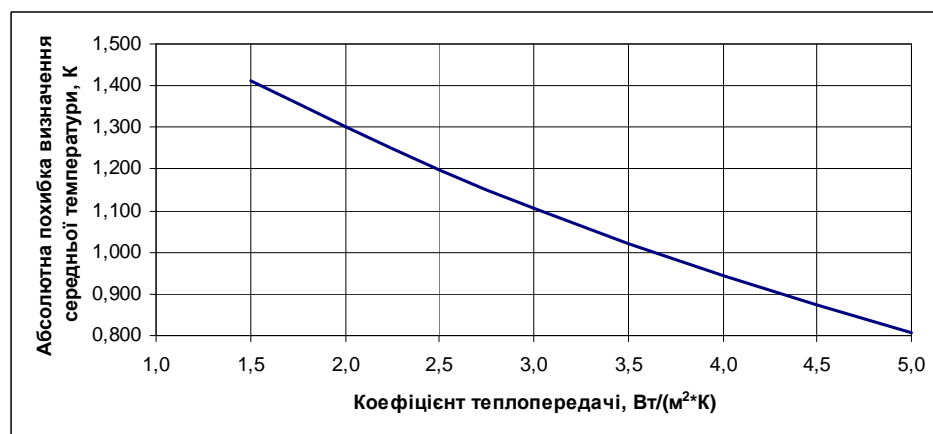
**Рисунок 2 – Залежність похибки у визначенні кінцевого тиску від коефіцієнта теплопередачі**



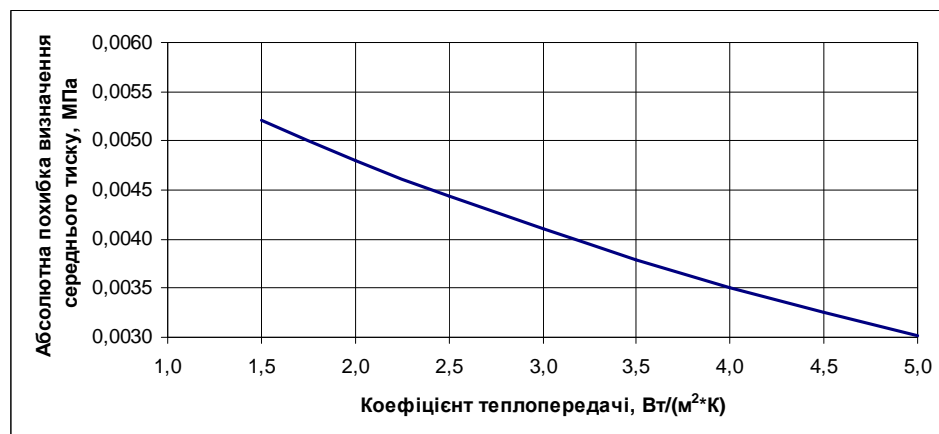
**Рисунок 3 – Залежність похибки у визначенні середньої температури від коефіцієнта теплопередачі**



**Рисунок 4 – Залежність похибки у визначенні середнього тиску від коефіцієнта теплопередачі**



**Рисунок 5 – Залежність абсолютної похибки між сусідніми значеннями середньої температури від коефіцієнта теплопередачі**



**Рисунок 6 – Залежність похибки між сусідніми значеннями середнього тиску від коефіцієнта теплопередачі**

Як видно з розрахунків похибка у визначенні середньої температури при збільшенні коефіцієнта теплопередачі у п'ять разів не перевищує 3 %, а похибка у визначенні середнього тиску не перевищує 0,4 %.

В той же час похибка в межах значень коефіцієнта теплопередачі з досвіду експлуатації 1,5...2,5 Вт/(м²·К) [5] похибки становлять 0,4 % та 0,07 % відповідно.



Слід зазначити, що з зменшенням діаметру газопроводу та з зменшенням витрати ці похибки ще зменшуються. Так, наприклад, для газопроводу DN 1020 мм вони становлять: по середній температурі 0,3 %, а по середньому тиску 0,06 %. Також похибка зменшується при зменшенні довжини ділянки газопроводу.

Отже можна зробити висновок, що зміна коефіцієнта теплопередачі в межах 1,5...2,5 Вт/(м<sup>2</sup>·К) практично не впливає на точність теплогидравлічного розрахунку.

### *Література*

- 1 Трубопровідний транспорт газу / [М.П.Ковалко, В.Я.Грудз, В.Б.Михалків та ін.]: за ред. М.П.Ковалка. – К.: АренаЕКО, 2002. – 600 с.
- 2 Кошелев А.А. Динамика теплового режима системы газопровод–грунт–воздух // А.А.Кошелев, В.А. Тарабрин. Динамика тепловых процессов.– К., 1980.– С.20.
- 3 Кривошеин Б.Л., Математическое моделирование теплового взаимодействия магистральных газопроводов большого диаметра с окружающей средой // Б.Л. Кривошеин, В.Н. Новаковский, В.П. Радченко // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт.– 1975.– № 1.– С.122-130.
- 4 Общесоюзные нормы технологического проектирования. Магистральные трубопроводы, Часть 1, Газопроводы : ОНТП 51-1-85, – [Введены 1986-01-01]. – М.: Мингазпром. – 221 с.
- 5 Ходанович И. Е. Тепловые режимы магистральных газопроводов / И.Е. Ходанович, Б.Л. Кривошеин, Р.Н. Бикчентай. – М.: Недра, 1971. – 216 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
10.06.12*

*Рекомендована до друку оргкомітетом  
міжнародної науково-технічної конференції  
“Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу”,  
яка відбулася 15-18 травня 2012 р.*