

## ВИЗНАЧЕННЯ КІЛЬКОСТІ ТЕПЛА, АКУМУЛЬОВАНОГО ГРУНТОМ НАВКОЛО ТРУБОПРОВОДУ

<sup>1</sup> В.Я. Грудз, <sup>1</sup> Я.В. Грудз, <sup>2</sup> А.В. Дацюк, <sup>1</sup> В.Д. Шологон

<sup>1</sup> ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42157,  
e-mail: public@nimg.edu.ua

<sup>2</sup> ДК "Укртрансгаз", 04053, м. Київ, Кловський узвіз, 9/1, тел. (044) 4612111,  
e-mail: adatsuk.utg@naftogaz.net

*Запропоновано нестационарну математичну модель розповсюдження тепла в навколишньому середовищі від теплового джерела газопроводу, наведено результати фізичного моделювання. Кількість тепла, яке акумулюється в ґрунті, можна представити різницею між кількістю тепла, що виділяється трубою за певний проміжок часу, і втратами тепла в навколишнє середовище з поверхні ґрунту за цей же час. Втрати тепла в навколишнє середовище визначалися за законом Фур'є за відомим розподілом температур у ґрунті. Отримано закономірність формування температурного поля навколо нагрітого газопроводу. Адекватність моделі доведено порівнянням прогнозних параметрів з фактичними даними, отриманими на фізичній моделі газопроводу.*

Ключові слова: коефіцієнт теплопередачі, газотранспортна система, втрата енергії

*Предложена нестационарная математическая модель распространения тепла в окружающей среде от теплового источника газопровода, приведены результаты физического моделирования. Количество тепла, аккумулируемое в грунте, можно представить разностью между количеством тепла, выделяемого трубой за некоторый отрезок времени, и потерями тепла в окружающую среду за это же время. Потери тепла в окружающую среду определялись согласно закону Фурье по известному распределению температур в грунте. Получена закономерность формирования температурного поля вокруг нагретого газопровода. Адекватность модели доказана сравнением прогнозных параметров с фактическими данными, полученными на физической модели газопровода.*

Ключевые слова: коэффициент теплопередачи, газотранспортная система, потеря энергии

*The non-stationary mathematical model of distribution of heat from the thermal source of gas pipeline in an environment is offered, the results of physical design are provided. Amount of heat which is accumulated in soil can be defined as a difference between the heat, produced by a pipe in a given interval of time, and losses of heat in an environment during that time. Losses of heat in an environment were determined by the law of Fur'e at the known distribution of temperatures in soil. As a result conformity of forming of the temperature field is obtained round the heated gas pipeline. Model adequacy is proven by comparing prognosis parameters to the fact sheets, obtained on the physical model of gas pipeline.*

Keywords: coefficient of heat-transfer, gas-transport system losses of energy

Повна енергія рухомого газу як сума його потенціальної, кінетичної та внутрішньої енергій визначається такими параметрами потоку, як тиск, швидкість і температура. В політропічному процесі розширення газу, характерному для магістральних газопроводів, підвищення температури газу зумовлює зростання його питомого об'єму та збільшення лінійних швидкостей потоку. Зростання лінійних швидкостей газу в трубопроводі і пов'язане з ним зростання турбулентних пульсацій викликає збільшення гідравлічних втрат енергії на виконання роботи силами внутрішнього тертя потоку і зростання дисипативних втрат енергії. Крім того, підвищення температури газу викликає зростання швидкості розповсюдження малих збурень у газовому потоці, що призводить до виникнення і зростання інерційних втрат енергії в газовому потоці. Вкажемо також на зростання динамічної в'язкості з підвищенням температури газу. Однак при русі газового потоку в зоні жорстких труб турбулентного режиму вплив внутрішнього тертя між шарами газу на загальні гідравлічні втрати енергії – мізерний.

Таким чином, збільшення внутрішньої енергії газу в газовому потоці призводить до зростання загальних гідравлічних втрат енергії, тож при сталій витраті газу виникає необхідність у підведенні енергії ззовні, тобто відбувається зростання енергетичних витрат на компресорних станціях, що виражається у збільшенні витрати паливного газу.

Для оцінки енергетичного стану газопроводу як складної системи необхідно встановити, яка частина загальної енергії перетворюється у внутрішню в процесі транспортування і розсіюється у довкілля, що допоможе визначити коефіцієнт корисної дії (ККД) газопроводу.

При роботі трубопроводу, яким транспортується нагрітий газ, в ґрунті навколо труби акумулюється значна кількість тепла. До цього часу не було методики, за якою можна було б точно визначити кількість акумульованого тепла навколо трубопроводу. В роботі [1] запропоновано формулу, яка базується на реалізації математичних моделей. Слід зауважити, що ця формула справедлива для квазістационарного

стану і є функцією характеристики ґрунту, температур стінки труби і ґрунту.

Тут наводиться послідовність розв'язання задачі.

Температура ґрунту, спричинена постійно-діючим лінійним джерелом тепла потужністю  $q$ , визначається таким виразом

$$u(x, y, z) = \frac{q}{4\pi\lambda} \left\{ \int_0^\tau e^{-\frac{x^2+(y-H)^2}{4a(\tau-\tau')}} \cdot \frac{d\tau'}{\tau-\tau'} + \int_0^\tau e^{-\frac{x^2+(y+H)^2}{4a(\tau-\tau')}} \cdot \frac{d\tau'}{\tau-\tau'} - 2h \int_0^\tau \int_0^\infty e^{-h\eta - \frac{x^2+(y+H+\eta)^2}{4a(\tau-\tau')}} \cdot \frac{d\tau'}{\tau-\tau'} \cdot d\eta \right\}. \quad (1)$$

Кількість тепла, яке акумулюється в ґрунті, можна визначити як різницю між теплом, яке виділяється трубою за даний відрізок часу  $Q_6$ , і втратами тепла в навколишнє середовище з поверхні ґрунту за цей же час  $Q_n$ .

$$Q_{акк} = Q_6 - Q_n, \quad (2)$$

Якщо тепловіддача з поверхні одиниці довжини труби постійно рівна  $q$ , то за час  $\tau$  буде виділено ґрунту кількість тепла

$$Q_6 = q\tau. \quad (3)$$

Втрати тепла в навколишнє середовище можна знайти за законом Фур'є за відомим розподілом температур у ґрунті. Спрямовуючи вісь у глибину масиву, отримаємо

$$Q_i = \lambda \int_0^\tau \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0} \cdot d\tau \cdot dx. \quad (4)$$

Знайдемо похідну від температури, яка визначається за формулою (1)

$$\left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0} = \frac{qh}{4\pi\lambda} \times \quad (5)$$

$$\times \int_0^\infty \frac{1}{(\tau-\tau')^2} \int_0^\infty (H+\eta) e^{-h\eta - \frac{x^2+(H+\eta)^2}{4a(\tau-\tau')}} d\eta \cdot d\tau'.$$

Підставивши отриманий результат в (4), матимемо

$$Q_i = \frac{qh}{4\pi\lambda} \times \quad (6)$$

$$\int_{-\infty}^{\tau+\infty} \int_0^\tau \int_0^\infty \frac{H+\eta}{(\tau-\tau')^2} e^{-h\eta - \frac{x^2+(H+\eta)^2}{4a(\tau-\tau')}} \cdot d\eta \cdot d\tau' \cdot d\tau \cdot dx.$$

Проводячи інтегрування виразу (5), отримаємо кількість тепла, яка втрачається у повітрі за час роботи трубопроводу

$$Q_i = q \left( \tau + \frac{H^2}{2a} + \frac{H}{ha} + \frac{1}{h^2a} \right) \cdot \left[ 1 - \Phi \left( \frac{H}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right] - q \sqrt{\frac{\tau}{\pi a}} \left( H + \frac{2}{h} \right) e^{-\frac{H}{4a\tau}} - \quad (7)$$

$$- \frac{q}{h^2a} e^{Hh+h^2a\tau} \left[ 1 - \Phi \left( \frac{H}{2\sqrt{a\tau}} + h\sqrt{a\tau} \right) \right].$$

Використовуючи отримані вирази для  $Q_6$  і  $Q_n$  відносно (2), знаходимо кількість тепла, яке акумулюється за час роботи трубопроводу

$$Q_{акк} = q\tau - q \left( \tau + \frac{H^2}{2a} + \frac{H}{ha} + \frac{1}{h^2a} \right) \left[ 1 - \Phi \left( \frac{H}{2\sqrt{a\tau}} \right) \right] + q \sqrt{\frac{\tau}{\pi a}} \left( H + \frac{2}{h} \right) e^{-\frac{H}{4a\tau}} + \quad (8)$$

$$+ \frac{q}{h^2a} e^{Hh+h^2a\tau} \left[ 1 - \Phi \left( \frac{H}{2\sqrt{a\tau}} + h\sqrt{a\tau} \right) \right].$$

Останнім членом виразу (8) можна знехтувати, враховуючи, що для широкої області значень критерію  $F_0$  та  $Hh$  цей член практично наближається до нуля.

Виразивши вираз (8) без останньої складової в безрозмірному вигляді, отримаємо

$$p = 1 - \left( 1 + \frac{1}{2F_0} + \frac{1}{Hh \cdot F_0} + \frac{1}{H^2 h^2 \cdot F_0} \right) \times \quad (9)$$

$$\times \left[ 1 - \Phi \left( \frac{1}{2\sqrt{F_0}} \right) \right] + \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot F_0}} \left( 1 + \frac{2}{Hh} \right) e^{-\frac{1}{4F_0}}.$$

При виведенні формули (9) були використані такі позначення:  $p = \frac{Q_{акк}}{q\tau}$ ;  $q$  – теплота з

одиниці поверхні довжини труби;  $\tau$  – час роботи трубопроводу;  $Hh = H \cdot \frac{a}{\lambda}$ ;  $H$  – глибина залягання трубопроводу до осі труб;  $a$  – коефіцієнт тепловіддачі від поверхні ґрунту у повітря

(при виведенні формули приймається постійним для всієї поверхні ґрунту; загалом може бути визначений за формулами конвективного теплообміну для горизонтальної площини з урахуванням випускання променів; в практичних розрахунках можна застосовувати значення  $a$  від 10 до 15 ккал/м<sup>2</sup>·год·°C);  $\Phi(z)$  – знак інтегралу вірогідності;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності ґрунту;  $F_0 = \frac{a\tau}{H^2}$  – критерій Фур'є;  $a$  –

коефіцієнт температуропровідності ґрунту.

З аналізу формули (9) випливає, що кількість акумульованого тепла є функцією глибини залягання трубопроводу, теплофізичних характеристик ґрунту, часу роботи трубопроводу і тепловіддачі з поверхні одиниці довжини труби.

Таблиця 1 – Результати дослідження

Діаметр труби, мм	Питома теплова інтенсивність джерела $q$ , кДж/м·год град	Глибина залягання трубопроводу $H$ , м	Кількість акумульованого тепла $Q_{акк}$ , кДж		Час $\tau$ , год
			за формулою (6)	за даними вимірювань	
1420	154	1,46	22116	19700	144
	178		54811	49500	308
	196		77273	74800	394
	215		182332	173600	850

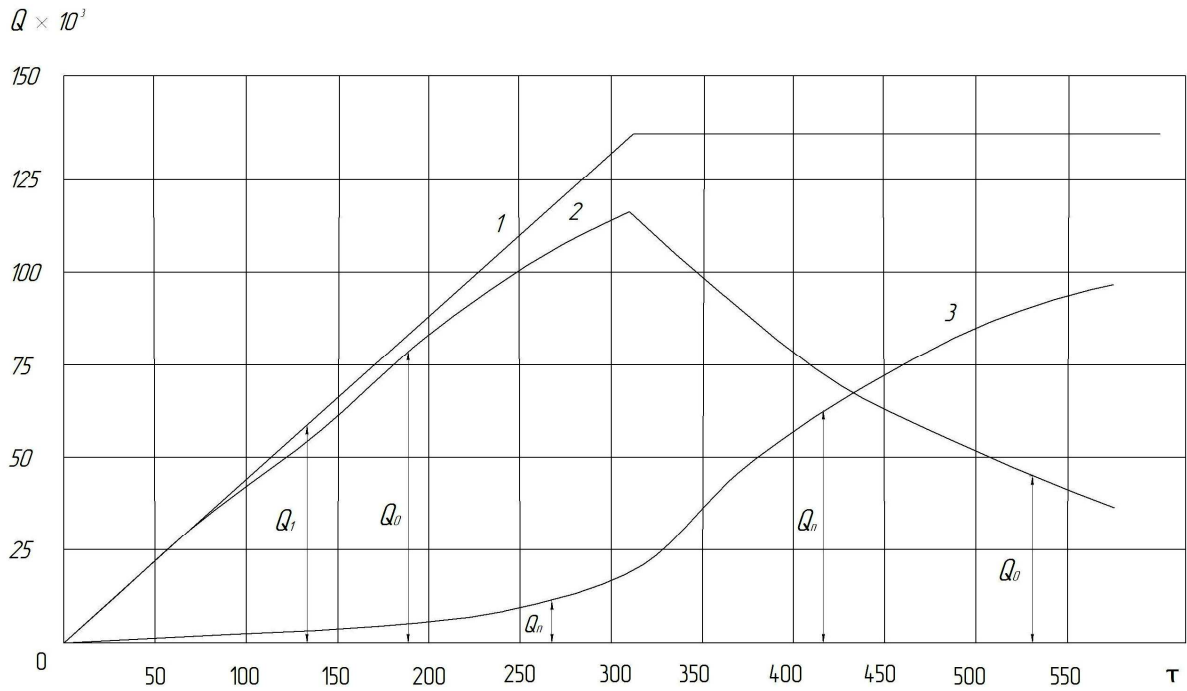


Рисунок 1 – Процес акумуляції тепла

За формулою (9) було обчислено (при  $h=10\text{м}^{-1}$ ;  $a=0,002\text{ м}^2/\text{год}$  – величини, які відповідають даним випробувального полігону, змонтованого на ділянці Богородчани – Хуст газопроводу СОЮЗ) кількість тепла, акумульованого навколо труб в ґрунті. Результати обчислень порівнювались з даними випробувань (таблиця 1).

Експерименти проводилися на випробувальному полігоні, створеному на базі ділянки газопроводу СОЮЗ, заглибленого на глибину 1,46 м до верхньої твірної труби довжиною 1013 м. Нагрівання труб здійснювалось газовим потоком, температура якого в різні моменти часу експлуатації була різною і залежала від температури довкілля, ступеня стиску КС та режиму роботи АПО. Температури ґрунту та труб вимірялись хромель-копелевими термопарами з електронними потенціометрами типу ЄПП-09. Термопарами охоплювались перерізи розміром  $3 \times 9$  м. У зоні проходження труби встановлено близько 100 термопар. Таким чином, на кожний момент часу вимірювалось температурне поле ґрунту, що дозволило оцінити зону впливу теплового джерела (в межах точ-

ності показів термопар). Крім цього, в процесі випробувань фіксувалась температура ґрунту в непорушеному тепловому стані за допомогою витяжних ґрунтових термометрів, встановлених на глибинах 0,2; 0,4; 0,8; 1,6 та 3,2 м, і температури повітря.

Для визначення коефіцієнта теплопровідності ґрунту  $\lambda_{гр}$  була запроєктована зондова установка, яка дозволяла визначити коефіцієнт температуропровідності  $a$  ґрунту. Зондовим методом визначались безпосередньо величина  $a$  за формулою

$$a = \frac{r^2}{4 \cdot \tau_{\max}}, \quad (10)$$

де:  $r$  – відстань від осі зонду до термопари;  $\tau_{\max}$  – час, через який досягався максимум температури в точці установа термометри.

За відомим значенням  $a$  знаходиться  $\lambda_{гр}$  зі співвідношення

$$\lambda_{\max} = a \cdot c \cdot \gamma. \quad (11)$$

У результаті проведених експериментів було встановлено, що величина  $a$  перебуває в

межах від 0,0017 до 0,0023 м<sup>2</sup>/год при зміні вологості  $\omega$  від 10 до 20%.

Коефіцієнт теплопровідності ґрунту  $\lambda_{тр}$  змінюється від 2,2 ккал/м·год·°С в зоні труби при нагріванні до 1,4 ккал/м·год·°С віддалених від труби точках ґрунту, де відсутній вплив джерела.

Експерименти оброблялись у такий спосіб: за даними вимірів були побудовані графіки зміни температури в часі за радіальними напрямками (угору і вниз від труби), а також по горизонтальному радіусу. Таким чином, на кожний момент часу кількість акумулюючого тепла в ґрунті на одиницю довжини труби буде рівною

$$Q = \gamma \int_{\Omega} (T - T_a) d\omega, \quad (12)$$

де:  $\gamma$  – густина ґрунту;  $c$  – питома масова теплоємність ґрунту;  $\omega$  – елемент площі поперечного перерізу ґрунту з температурою  $T$ ;  $\Omega$  – площа поперечного перерізу ґрунту, на якій відчувався вплив джерела тепла.

На внутрішній границі площі температура рівна температурі поверхні труби, на зовнішній границі – температурі ґрунту в природному стані  $T_e$ . За відомих температур ґрунту і зони впливу джерела шляхом графічного інтегрування визначалась кількість тепла, акумульована ґрунтом навколо трубопроводу. Графік процесу акумуляції тепла представлений на рис. 1. На цей же графік точками нанесені значення  $Q_{акк}$ , обчислені за формулою (6).

На рис. 1 пряма 1 характеризує кількість тепла, яке виділяється трубою за час експерименту; крива 2- кількість акумульованого ґрунтом тепла; крива 3- втрати тепла в навколишнє середовище. Збіг результатів розрахунків з даними експерименту цілком задовільний.

### *Література*

1. Ковалко М.П. Трубопровідний транспорт газу / [М.П. Ковалко, В.Я. Грудз, В.Б. Михалків та ін.]. – К.: АренаЕКО, 2002. – 600 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
04.02.11*

*Рекомендована до друку професором  
Д. Ф. Тимківим*