

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛООВОГО СТАНУ ПІДЗЕМНОЇ ДІЛЯНКИ ТРУБОПРОВОДУ

*О.І. Вольченко, Н.В. Мойсишин, А.В. Мойсишин*

*ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42123,  
e-mail: m e s h m a s h @ n u n g . e d u . u a*

*В лабораторних умовах вивчаються процеси нагрівання та охолодження підземних ділянок трубопроводів. Визначення товщини теплоізоляції проводиться з урахуванням її теплового опору, критерію якості та умови запобігання максимальним втратам питомої теплоти на одиницю довжини підземного трубопроводу.*

Ключові слова: трубопровід, теплопровідність, тепловий баланс, нагрівання, охолодження, товщина теплоізоляції.

*В лабораторных условиях изучаются процессы нагревания и охлаждения подземных участков трубопроводов. Определение толщины теплоизоляции проводится с учетом ее теплового сопротивления, критерия качества и условия предотвращения максимальных потерь удельной теплоты на единицу длины подземного трубопровода.*

Ключевые слова: трубопровод, теплопроводность, тепловой баланс, нагревание, охлаждение, толщина теплоизоляции.

*The methods of heating and cooling of pipelines of the underground setting at transporting of gas or liquid are examined in laboratory terms. The thickness of heat isolation of areas of pipelines taking into account their thermal resistance, prevention of maximal loss of specific warmth on unit of length of pipe are certain.*

Keywords: pipeline, heat conductivity, thermal balance, heating, cooling, thickness of heat isolation.

### Актуальність роботи

Підземні трубопроводи працюють в умовах значних внутрішніх і зовнішніх теплових впливів. Відомі методи визначення кількості теплоти [1] базуються на застосуванні різних типів калориметрів, проте вони не використовуються через значну протяжність і велику вагу трубопроводу, за їх показами неможливо окремо оцінити інтенсивності природного і вимушеного конвективних охолоджень внутрішньої і зовнішньої поверхонь трубопроводу та дати точну оцінку втратам тепла від кондуктивної складової теплообміну.

За відомими поверхневою і об'ємною температурами трубопроводу у ході його експлуатації можна оцінити тепловий баланс складного теплообміну, правильно вибрати матеріал теплоізоляції та її товщину, проте відомі рівняння теплового балансу для елементарної ділянки поверхні теплопередачі не враховують теплових втрат у ній [2].

При визначенні товщини теплоізоляції оперують коефіцієнтами тепловіддачі від її зовнішньої поверхні, що не зовсім коректно, оскільки стінка теплоізоляції також бере участь у процесі теплопередачі [3].

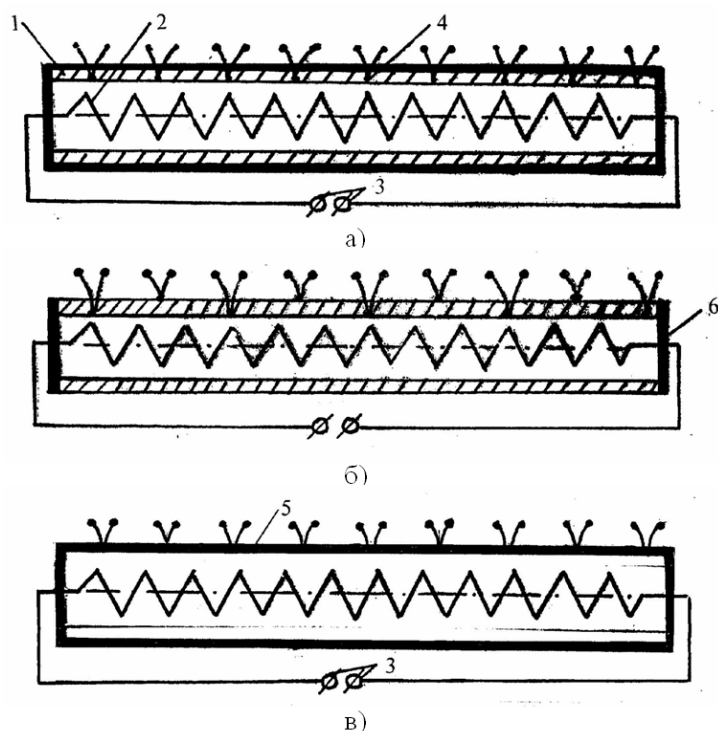
Недоліком наявних методів розрахунку теплопровідності є те, що при визначенні втрат теплоти в досліджуваних ділянках трубопроводу обов'язково потрібно знати поверхневі або об'ємні температури та коефіцієнти тепловіддачі у процесах природної і вимушеної конвекції та випромінювання. Перші розраховують, а другі вибирають з довідкової літератури, як певні усереднені величини.

### Мета і постановка задачі дослідження

Метою роботи є визначення втрат теплоти ділянки підземного трубопроводу температурним способом для знаходження коефіцієнтів тепловіддачі за природної і вимушеної конвекції та випромінювання і, як наслідок, правильного вибору товщини теплоізоляції з перевіркою її якості на зовнішній поверхні труби в інтервалах температур оточуючого ґрунтового масиву при моделюванні умов експлуатації трубопроводу.

Поставленої мети досягають так. В лабораторних умовах нагрівають теплоізолювану (першу) від навколишнього середовища, нетеплоізолювану (другу) та теплоізолювану (третю) труби електронагрівачами впродовж однакових проміжків часу. При цьому третя труба є теплоізоляцією для першої. За співвідношенням об'ємних температур (замірюються термометрами) внутрішніх і зовнішніх стінок другої до першої та третьої до першої труб визначають втрати теплоти на нагрівання тіл другої і третьої труб, тобто кондуктивну складову теплообміну. Після цього поверхням першої і другої труб дають можливість за деякий проміжок часу охолонути від одержаного тепла, і за одержаними даними визначають коефіцієнти тепловіддачі при випромінюванні та природному конвективному охолодженні. За одержаними даними розраховують товщину теплової ізоляції першої труби, попередньо визначивши втрати питомої теплоти на одиницю довжини ділянки трубопроводу.

Далі розрахунковим шляхом визначають співвідношення теплових опорів перерізів теп-



1 – циліндрична труба, 2 – нагрівальний пристрій, 3 – клеми електричного кола, 4 – електроди термопар, 5 – теплоізоляція, 6 – теплоізоляційні елементи на торцях труби

**Рисунок 1 – Конструкції теплоізолюваної (а), нетеплоізолюваної (б) ділянок трубопроводу та теплової ізоляції (в) з нагрівальними пристроями**

лоізоляції та ділянки трубопроводу. Якщо вказане співвідношення перевищує допустиму величину для розгляданого діаметра труби, то товщину теплоізоляції вибрано невірно, тому дослідження повторюють з першого етапу.

Після цього знімають нагрівальні пристрої з першої та другої труб і по чергові поміщають їх у випробну камеру експериментальної установки. При цьому труби знаходяться у верхньому і нижньому ґрунтових масивах, де задані температури підтримуються теплообмінниками. За рахунок робочого тіла, що подається в труби, підтримуємо тепловий стан труб аналогічний тому, який був би при нагріванні нагрівальними пристроями, тобто витримуємо однакову складову кондуктивного теплообміну. За температурами робочого тіла, стінок першої та другої труб визначаємо коефіцієнти тепловіддачі при випромінюванні та вимушеній конвекції з їх поверхонь.

Зрештою, згідно з тепловою моделлю підземної ділянки трубопроводу, визначають коефіцієнти теплопередачі в теплообмінних процесах через багаточарові об'єкти, а також перевіряють теплоізоляцію ділянки трубопроводу за критерієм якості та на максимальну втрату питомої теплоти на одиницю її довжини.

#### Про експериментальну установку та методи нагрівання і охолодження ділянок трубопроводу

На рис. 1, а і б зображено теплоізолювану і нетеплоізолювану ділянки трубопроводу із

вмонтованими в їх порожнини нагрівальними пристроями; на рис.1в зображено теплову ізоляцію (у вигляді циліндричної труби) з нагрівальним пристроєм; на рис.2б і 2в – поперечні перерізи трубопроводу і теплоізоляції. Рисунок 2а ілюструє теплову модель підземної ділянки трубопроводу, а рис.3 – принципову схему експериментальної установки для моделювання теплового стану ділянок трубопроводу підземного призначення.

На рис. 2 використано такі позначення:

$d_1, d_2$  – внутрішній і зовнішній діаметри трубопроводу;

$d_3, d_4$  – внутрішній і зовнішній діаметри теплоізоляційної труби;

$t'_1, t_0$  – температури робочого тіла, що протікає через трубу, та навколишнього середовища відповідно;

$t_1, t_2$  – температури внутрішньої і зовнішньої поверхонь труби відповідно;

$t_3, t_4$  – температури внутрішньої і зовнішньої поверхонь теплоізоляційної труби відповідно;

$t_5, t'_5$  – температура масиву ґрунту над і під ділянкою трубопроводу відповідно.

Згідно з рис.1, в циліндричну трубу 1 встановлено нагрівальний пристрій 2, підключений до клем 3 електричного кола. При цьому гарячі спаї термопар 4 в першій трубі, повністю покриті ізоляцією, виведено врівень з її внутрішньою поверхнею.

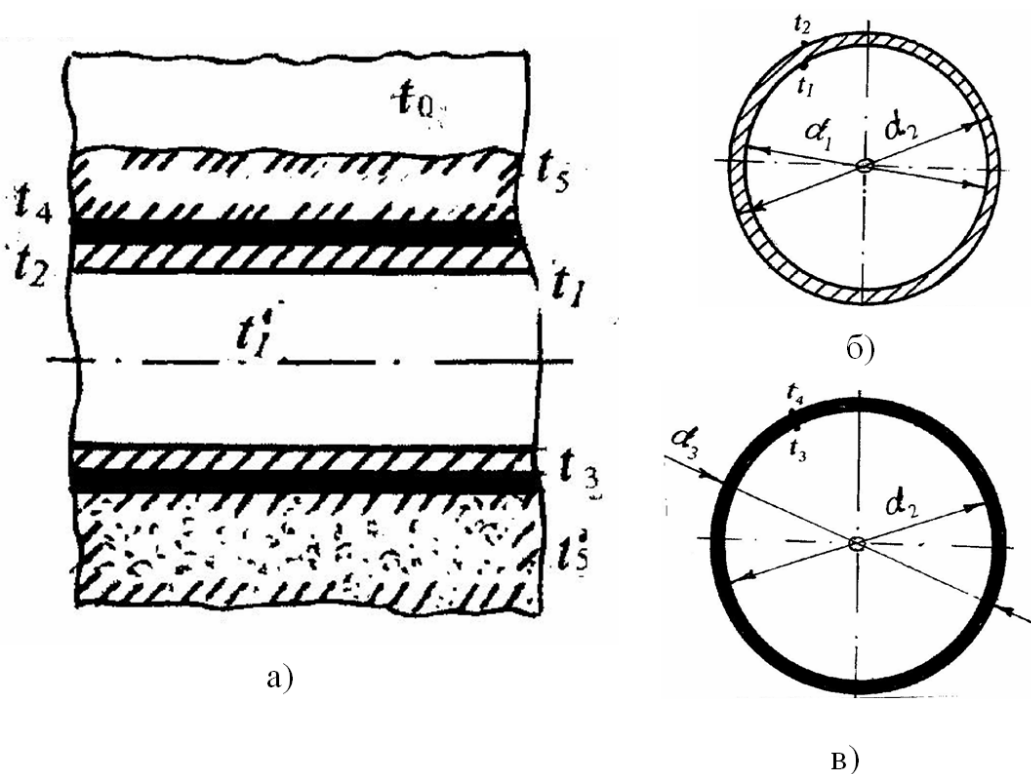


Рисунок 2 – Теплова модель підземної ділянки трубопроводу (а) та поперечні перерізи труби (б) і теплоізоляції (в)

Товщину шару ізоляції трубопроводу знаходимо із залежності

$$\delta_{iz} = \lambda_{iz} F \frac{t_{z.m.} - t_{z.iz.}}{Q},$$

де:  $\lambda_{iz}$  – коефіцієнт теплопровідності теплоізоляції,  $Bm/(m \cdot ^\circ C)$ ;  $F$  – площа поверхні теплоізоляції,  $m^2$ ;  $t_{z.m.}$ ,  $t_{z.iz.}$  – температури зовнішніх поверхонь: трубопроводу і теплоізоляції,  $^\circ C$ ;  $Q$  – кількість теплоти, що передається від робочого тіла трубопроводу, через його стінку і теплоізоляцію, Вт.

У другій трубі 1 гарячі спай термодар 4 виведено з її внутрішніх і зовнішніх поверхонь, при цьому теплоізолювано тільки торці труби 1. У третій трубі торці труб 1 закрито теплоізоляційним елементом 6, а гарячі спай термодар 4 виведено тільки з її внутрішньої поверхні.

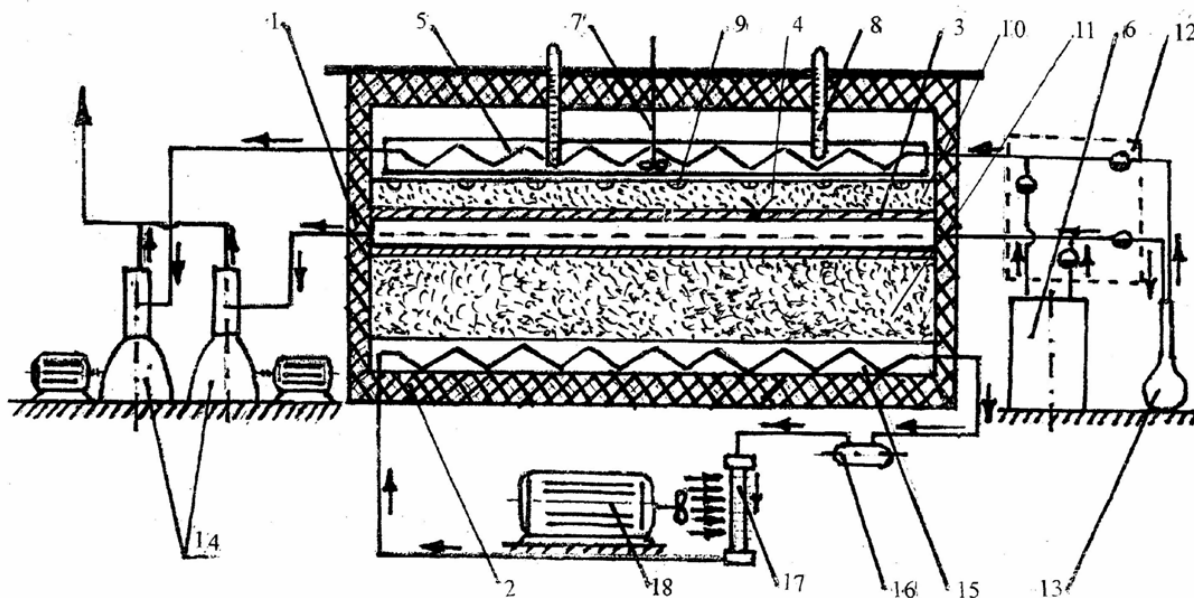
Електроди термодар підключаються до реєструючої апаратури (на рис. не зображена) для фіксації термоЕРС. Далі за тарувальним графіком знаходимо температуру, що відповідає замірянній термоЕРС. Перед нагріванням в лабораторних умовах труби 1 кладуть на підставки, виготовлені з матеріалу з низькою теплопровідністю, наприклад ебоніту або текстоліту.

На рис. 3 зображено експериментальну установку для моделювання теплового стану ділянки трубопроводу, призначеної для імітації газопроводу або нафтопроводу. Установка має камеру 1, покриту з зовнішнього боку теплоізоляцією 2. В камері 1 розміщено трубу 3, в стінки якої вмонтовано електроди термодар 4, ви-

ведені назовні. Зверху трубопроводу 3 розміщується теплообмінник 5, який за допомогою електропечі 6 забезпечує нагрівання повітря, що подається в камеру 1. Перемішування повітря в камері здійснюється пристроєм 7. Температура повітря в теплообміннику 5 контролюється за допомогою термометрів 8. За допомогою сопел 9 імітується обдування повітрям верхнього масиву ґрунту 10. Нижній масив ґрунту 11 розміщується під трубою 3. Електропіч 6 зв'язана з вузлом перемикачів потоків повітря 12 на теплообмінник 5 і трубу 3, кінці циркуляційних контурів яких заведені в посудину Дьюара 13. Остання – це колба з подвійними посрібленими стінками, з простору між якими викачано повітря. Теплопровідність розрідженого газу між стінками є настільки малою, що температура повітря, яке проходить через цю посудину, залишається постійною досить тривалий проміжок часу. Через значні об'єми повітря посудину Дьюара виконано з металу. Таким чином, в камері 1 підтримується постійна температура навколишнього середовища, вища  $0^\circ C$ .

У випадку імітації газу в трубі 3 за рахунок прокачування вакуумним насосом 14 азоту або підігрітого повітря підтримується температура, що відповідає температурі газу в трубопроводі у природних умовах, тобто в умовах, коли транспортований газ після компресорної системи знижує свою температуру в апаратах повітряного охолодження.

Під трубою 3 встановлено теплообмінник 15, що входить до самостійного контуру з шестерінчастим насосом 16 і холодильником 17.



1 – камера, 2 – теплоізоляція, 3 – труба, 4 – електроди термопар, 5 – теплообмінник, 6 – електропіч, 7 – пристрій для перемішування повітря, 8 – термометр, 9 – сопла, 10 – верхній масив ґрунту, 11 – нижній масив ґрунту, 12 – вузол перемикання потоків повітря, 13 – посудина Дьюара, 14 – вакуумний насос, 15 – теплообмінник, 16 – шестерінчастий насос, 17 – холодильник, 18 – вентилятор

**Рисунок 3 – Принципова схема експериментальної установки для моделювання теплового стану підземної ділянки трубопроводу**

Останній охолоджується вентилятором 18. Таким чином, в нижній частині камери 1 підтримується постійна температура масиву ґрунту 11, нижча 0°C.

Нагрівання і охолодження підземних ділянок трубопроводів для визначення товщини їх теплоізоляції здійснюються в лабораторних умовах у вісім етапів.

*Перший етап.* Визначаються втрати теплоти кондуктивним теплообміном. При цьому за допомогою клем 3 в електричну мережу одночасно підключають нагрівальні пристрої 2 у двох трубах 1. Нагрівальний пристрій 2 забезпечує нагрівання тіла першої труби 1, тобто термопарі 4 покажуть вищу температуру, ніж термопарі другої труби. Це пояснюється тим, що наявність повної теплоізоляції 5 першої труби виключає дві складові теплового балансу – природний конвективний теплообмін та випромінювання з її поверхні в довкілля. Після цього через співвідношення поверхневих температур другої труби ( $t_1 - t_2$ ) (рис. 4) до першої ( $t_3$  – температура внутрішньої поверхні труби)

за залежністю вигляду  $\left( \frac{t_1 - t_2}{t_3} \right)$  визначають частку теплоти, що витрачається на кондуктивну складову теплообміну, тобто на нагрівання ділянки труби. Далі через співвідношення заміряних поверхневих температур третьої труби ( $t_5 - t_6$ ) ( $t_5, t_6$  – температури: внутрішньої і зовнішньої поверхонь теплоізоляційної труби) до першої труби ( $t_1 - t_4$ ) (рис.6) за залежністю

вигляду  $\left( \frac{t_5 - t_6}{t_1 - t_4} \right)$  визначають частку теплоти, що витрачається на кондуктивну складову теплообміну, тобто на нагрівання ділянки труби, виготовленої із теплоізоляції.

Так, наприклад, при співвідношенні вказаних температур  $\frac{100 - 60}{80}$  частка теплоти, що витрачається на кондуктивний теплообмін, складає 50%. На цьому ж етапі можна визначити частку теплоти, яка витрачається на кондуктивний теплообмін теплоізоляційної ділянки труби, тобто  $\frac{60 - 40}{100 - 20} = 0,25$ , що складає 25%.

*Другий етап.* Визначають теплові втрати через випромінювання і природний конвективний теплообмін з нагрітих поверхонь першої і другої труб, знявши з них теплоізоляційні елементи 6 і вилучивши з їх об'ємів нагрівальний пристрій 2.

У результаті усталеного теплового стану другої і третьої труб (за мінімального температурного градієнту по товщині труби), одержаного на першому етапі, фіксують час випромінювального і природного конвективного охолодження. Після цього визначають інтенсивність випромінювального і природного конвективного теплообміну, тобто коефіцієнт тепловіддачі від поверхонь першої і другої труб в заданих інтервалах температур.

Так, наприклад,  $Q = IU\tau$ , кДж (кількість теплоти, витраченої на прогрівання першої

труби;  $I$  – сила струму, А;  $U$  – напруга, В;  $\tau$  – час, с). З іншого боку, така ж кількість теплоти ( $Q$ ) розсіюється з поверхонь ( $F$ ) першої і другої труб за час ( $\tau$ ) за різниць температур відповідно  $(t_1 - t_4)$  та  $(t_1 - t_0)$ . Коефіцієнти тепловіддачі дорівнюватимуть відповідно

$$\alpha'_1 = \frac{Q'_1}{F_1 \tau (t_1 - t_4)} \quad (1)$$

та

$$\alpha'_2 = \frac{Q'_2}{F_2 \tau (t_1 - t_4)}, \quad (2)$$

де:  $Q'_1$  і  $Q'_2$  – кількості теплоти, витрачені на нагрівання першої і другої труб;  $\alpha'_1$  і  $\alpha'_2$  – коефіцієнти тепловіддачі від зовнішніх поверхонь першої та другої труб;  $F_1$ ,  $F_2$  – площі поверхонь теплообміну першої і другої труб.

*Третій етап.* Попередньо визначаємо товщину теплової ізоляції за залежністю

$$\delta_{is} = \frac{d_2}{2} \left[ \exp \left( \frac{2\pi\lambda_{is}(t_3 - t_4)}{q_1} \right) - 1 \right], \quad (3)$$

де:  $d_2$  – внутрішній діаметр теплоізоляції;  $\lambda_{is}$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу теплоізоляції;  $t_3$ ,  $t_4$  – відповідно температури внутрішньої і зовнішньої поверхонь теплоізоляційної труби;  $q_1$  – втрати питомої теплоти на одиницю довжини трубопроводу.

При цьому  $q_1$  визначають за залежністю вигляду

$$q_1 = K'_l \pi (t_1 - t_2),$$

де  $K'_l$  – коефіцієнт теплопередачі через товщину стінки труби.

Коефіцієнт теплопередачі визначається за формулою

$$K'_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}}, \quad (4)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу труби.

*Четвертий етап.* За відомою товщиною теплоізоляції ( $\delta_{is}$ ) знаходимо співвідношення між тепловими опорами перерізів теплоізоляції ( $R_{is}$ ) і трубопроводу ( $R$ )

$$\frac{R_{is}}{R} = \frac{\lambda}{\lambda_{is} \delta_{is}} \frac{(r_2^2 - r_1^2)}{(\delta_{is} + d_2)} \leq \left[ \frac{R_{is}}{R} \right], \quad (5)$$

де:  $\lambda$ ,  $\lambda_{is}$  – коефіцієнти теплопровідності матеріалів трубопроводу і його теплоізоляції;  $r_1$ ,  $r_2$  – відповідно зовнішній і внутрішній радіуси поверхонь трубопроводів;  $d_2$  – діаметр зовнішньої поверхні трубопроводу;  $\delta_{is}$  – товщина теплоізоляції трубопроводу.

Одержане співвідношення повинно бути меншим або рівним допустимої величини  $\left[ \frac{R_{is}}{R} \right]$ .

*П'ятий етап.* Визначають втрати через випромінювання і природний конвективний теплообмін з поверхонь другої циліндричної труби (рис.1б).

Для реалізації п'ятого етапу с першої циліндричної труби (рис.1а) знімають теплоізоляційний елемент 5 і нагрівальний пристрій 2, від'єднують електропроводи, що ведуть до клем 3, а також від термоелектродів термопар 4. Після цього першу і другу труби (рис.3) по чергово поміщають в камеру 1 експериментальної установки і до термоелектродів термопар 4 на їхніх зовнішній і внутрішній поверхнях під'єднують електропроводи. Особливістю випробовувань першої і другої труб є те, що шляхом подавання через сопла 9 повітря або рідин з різними термодинамічними параметрами в ґрунтовий масив 10 імітують в камері 1 вимушений конвективний теплообмін.

Після пропускання нагрітих газу або рідини через порожнини першої і другої труб, встановлених по чергово в камері 1, підтримують їх тепловий стан аналогічний тому, що був при нагріванні нагрівальними пристроями, тобто витримують однакову складову кондуктивного теплообміну. Через співвідношення об'ємних температур другої труби  $(t'_1 - t_0)$  (де  $t_0$  – температура робочого тіла) до першої  $(t'_3 - t_0)$  за однакових складових кондуктивного теплооб-

міну, тобто за формулою  $\left( \frac{t'_1 - t_0}{t'_3 - t_0} \right)$ , визначаємо

частку теплоти, що розсіюється в ґрунтових масивах випромінювальним і природним конвективним теплообміном з поверхонь першої труби. Це в подальшому дасть можливість визначити інтенсивність теплообміну їх поверх-

онь за залежностями вигляду  $\alpha_1 = \frac{Q_1}{F_1 \cdot \tau (t'_3 - t_0)}$

і  $\alpha_2 = \frac{Q_4}{F_2 \cdot \tau (t'_1 - t_0)}$ , де  $Q_1$  і  $Q_4$  – кількості теплоти, витрачені на нагрівання першої та другої труб;  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – коефіцієнти тепловіддачі із зовнішніх поверхонь першої та другої труб;  $F_1$ ,  $F_2$  – площі поверхонь теплообміну першої та другої труб;  $\tau$  – час.

*Шостий етап.* Згідно теплової моделі підземної ділянки трубопроводу (рис. 6) визначаємо коефіцієнти теплопередачі в теплообмінних процесах через такі багаточарові об'єкти, як:

– “робоче тіло трубопроводу – товщина стінки трубопроводу – середовище, що оточує трубопровід”

$$K_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2}}, \quad (4a)$$

де:  $\alpha_1, \alpha_2$  – коефіцієнти тепловіддачі від робочого тіла, що протікає через трубопровід, до внутрішньої поверхні і від зовнішньої поверхні труби до середовища, що оточує трубопровід;  $d_1, d_2$  – відповідно внутрішній і зовнішній діаметри труби;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу труби.

– “зовнішня поверхня труби – товщина циліндричної стінки теплоізоляції – середовище, що оточує теплоізоляцію”

$$K_{l_1} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_2 d_2} + \frac{1}{2\lambda_{из}} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_3 d_3}}, \quad (4б)$$

де:  $\alpha_3$  – коефіцієнти тепловіддачі від зовнішньої циліндричної поверхні теплоізоляції до навколишнього середовища;  $d_2, d_3$  – діаметри: внутрішній та зовнішній циліндричної стінки теплоізоляції;  $\lambda_{из}$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу теплоізоляції.

– “зовнішня поверхня циліндричної теплоізоляції – товщина масиву ґрунту – навколишнє середовище”

$$\frac{1}{K_{l_2}} = \frac{1}{\alpha_3 d_3} + \sum_1^n \frac{\delta_i}{2\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_4}, \quad (4в)$$

де:  $\alpha_4$  – коефіцієнти тепловіддачі від поверхні масиву ґрунту до навколишнього середовища;  $\delta_i$  – товщина шарів різних складових масиву ґрунту;  $\lambda_i$  – коефіцієнт теплопровідності шарів різних складових масиву ґрунту.

Зрозуміло, що повинна виконуватись умова  $K_{l_1} > K_{l_1} > K_{l_2}$ .

*Сьомий етап.* Шляхом порівняння процесів теплопередачі ізолюваної та нетеплоізолюваної ділянок трубопроводів перевіряють теплоізоляцію за критерієм якості

$$\lambda_{из} < 0,5K_{l_1}d_2, \quad (6)$$

де:  $\lambda_{из}$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу теплоізоляції;  $K_{l_1}$  – коефіцієнт теплопередачі через циліндричну стінку теплоізоляції;  $d_2$  – діаметр внутрішньої поверхні циліндричної теплоізоляції.

*Восьмий етап.* У випадку неправильного визначення товщини теплоізоляції, тобто при збільшеному зовнішньому діаметрі теплоізоляції, проводимо перевірку на максимальну втрату питомої теплоти на одиницю довжини трубопроводу за залежністю вигляду

$$\lambda[d_3] < \frac{2\lambda_{из}}{K_{l_1}}, \quad (7)$$

де:  $d_3$  – діаметр зовнішньої поверхні теплоізоляції;  $\lambda_{из}$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу теплоізоляції;  $K_{l_1}$  – коефіцієнт теплопередачі через циліндричну стінку теплоізоляції.

Порівняльний аналіз методів оцінки теплових втрат підземних ділянок трубопроводів виявив такі переваги запропонованого температурного методу:

– можливість поетапного визначення теплових втрат ділянок трубопроводів різних діаметрів у лабораторних умовах;

– теплота, яка вноситься в ділянку трубопроводу, забезпечується електричним струмом за допомогою нагрівального пристрою, що дає змогу оцінити кондуктивну складову теплообміну;

– визначення втрат теплоти, викликаних природною конвекцією і випромінювальним теплообміном, проводиться за однакові проміжки часу шляхом порівняння нетеплоізолюваної і теплоізолюваної від довкілля ділянок трубопроводу, а також теплоізоляції, виконаної у вигляді труби, в лабораторних умовах;

– визначення товщини теплоізоляції підземної ділянки трубопроводу проводиться з урахуванням її теплового опору, критерію якості та запобігання максимальній втраті теплоти на одиницю довжини трубопроводу.

## Висновки

Вивчення в лабораторних умовах процесів нагрівання і охолодження підземних ділянок трубопроводів дає можливість оцінити тепловий баланс розглядуваної ділянки трубопроводу, визначити втрати теплоти шляхом випромінювання, природного і вимушеного теплообміну з поверхонь трубопроводу та теплоізоляції в довкілля, а також шляхом кондуктивного теплообміну в тіло труби.

Наведено залежність (3) для визначення товщини теплової ізоляції ділянки трубопроводу, умову (5) для перевірки теплоізоляції за критерієм якості та нерівність (6), яка дає можливість вказати допустимий зовнішній діаметр теплоізоляції.

## Література

1 Кириллин В.А. Основы экспериментальной термодинамики / В.А. Кириллин, А.Е. Шейндлин. – М.–Л.: Государств. энергетич. из-во, 1950. – 310 с.

2 Поршаков Б.П. Термодинамика и теплопередача (в технологических процессах нефтяной и газовой промышленности): учебник для вузов / Б.П. Поршаков, Р.Н. Бикчентай, Б.А. Романов. – М.: Недра, 1987. – 333 с.

3 Ерохин В.Г. Основы термодинамики и теплотехники / В.Г. Ерохин, М.Г. Маханько, П.И. Самойленко. – М.: Машиностроение, 1980.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
10.09.10

Рекомендована до друку професором  
Грудзом В.Я.