



## THE METHOD OF DETERMINING HEAT LOSSES AT SECTIONS OF PIPELINE

### МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОВИХ ВТРАТ НА ДІЛЯНКАХ ТЕПЛОТРАС

Vorobiov L.Y. / Воробйов Л.Й.

*Dts, s.r. / д.т.н., с.н.с.*

ORCID : 0000-0001-7958-6996

Dekusha L.V. / Декуша Л.В.

*Dts, s.r. / д.т.н., с.н.с.*

ORCID : 0000-0003-1881-0880

Ivanov S.O. / Іванов С.О.

*Ph.d. / к.т.н.*

ORCID : 0000-0002-2722-7323

**Анотація.** В роботі розглядаються методи експериментального визначення теплових втрат на ділянках теплотрас. Показано, що для визначення тепловтрат, необхідно вимірювати витрату теплоносія і його температуру на початку та в кінці ділянки. Для визначення витрати теплоносія існують витратоміри різних типів, а для визначення температури необхідні прецизійні термометри з можливістю довготривалого запису даних. Стисло розглянуті електронні термометри для установки в гільзи на трубопроводах, які були створені раніше. Показано, що температуру теплоносія можна вимірювати і на ділянках трубопроводів, що не оснащені гільзами. Температура теплоносія розраховується на підставі результатів вимірювання температури поверхні трубопроводу з врахуванням теплового потоку крізь стінку труби та її теплового опору. Запропоновано застосування накладного комбінованого перетворювача теплового потоку і температури та описаний метод визначення теплового опору стінки трубопроводу.

**Ключові слова:** тепловтрати на трубопроводах, температура, тепловий потік.

#### Вступ.

У системах централізованого теплопостачання значна частка тепловтрат (за деякими даними до 20...30%) припадає на теплові мережі. Це пов'язано з тим, що третина всіх теплових магістралей зношена і знаходиться в аварійному стані. Оскільки ремонт і перекладка теплотрас дуже дорогі, визначення необхідності і черговості таких робіт набувають першорядного значення. Виробники труб для теплотрас та будівельно-монтажні організації зацікавлені в нарощуванні обсягу робіт, не завжди враховуючи реальний стан замінних теплотрас і економічну ефективність проведених робіт. Правильне визначення черговості перекладки теплотрас дозволить заощадити енергоресурси і мінімізувати витрати. Тривалість експлуатації теплотраси не є основним критерієм необхідності перекладки, оскільки на стан трубопроводу і теплоізоляції впливає безліч факторів, починаючи від конструкції траси, типу ґрунту і рівня ґрунтових вод і закінчуючи якістю монтажу, нанесення ізоляції і режимом експлуатації. Досить достовірним критерієм стану теплотраси є реальні питомі (на 1 м довжини) тепловтрати на ділянці мережі. Допустимі питомі тепловтрати для трубопроводів різних діаметрів нормовані, однак, оскільки ці норми розроблені кілька десятиліть тому [1], не враховують можливостей сучасних теплоізоляційних матеріалів і цін на енергоносії, вони навряд чи можуть бути єдиним і об'єктивним критерієм необхідності перекладки теплотраси.



На магістральних ділянках теплотрас при великих значеннях енергії, що передається, відносні тепловтрати значно менше похибки вимірювань сучасних промислових теплолічильників. Тому проводять дорогі періодичні випробування тепломереж, при яких окремі ділянки з'єднують в кільце і при малій витраті теплоносія (води) вимірюють перепади температури на кожній з ділянок. У зв'язку з цим досить актуальною є розробка методів вимірювань і апаратури, що дозволяють проводити контроль тепловтрат на ділянках теплотрас в режимах, близьких до експлуатаційних.

### Метод визначення інтегральних теплових втрат на ділянці теплотраси

Потужність інтегральних тепловтрат  $Q_{ТВ}$  на ділянці теплотраси може бути розрахована як відношення різниці повних енергій теплоносія, що пройшов початок і кінець контрольованої ділянки, до тривалості вимірювань [2]:

$$Q_{ТВ} = \left[ \int_{\tau_1}^{\tau_2} T_{M1} \cdot g_{M1} \cdot c_v \cdot d\tau - \int_{\tau_1 + \Delta\tau_1}^{\tau_2 + \Delta\tau_2} T_{M2} \cdot g_{M2} \cdot c_v \cdot d\tau \right] / (\tau_2 - \tau_1) \quad (1)$$

де  $\tau_1$  і  $\tau_2$  – початковий і кінцевий моменти проведення вимірювань на початку ділянки;

$\Delta\tau_1$  і  $\Delta\tau_2$  – тривалість проходження ділянки теплотраси елементарним об'ємом води, що надійшли на ділянку, відповідно, в початковий і кінцевий моменти вимірювання;

$T_{M1}$  і  $T_{M2}$  – миттєві значення температури води на початку і кінці ділянки;

$g_{M1}$  і  $g_{M2}$  – миттєві значення об'ємної витрати води на початку і кінці ділянки;

$c_v$  – об'ємна теплоємність води.

У загальному випадку змінними величинами є не тільки температури  $T_{M1}$  і  $T_{M2}$ , але і витрати  $g_{M1}$  і  $g_{M2}$ , внаслідок чого  $\Delta\tau_1$  і  $\Delta\tau_2$  не однакові. Теплоємність  $c_v$  є функцією температури і тиску. Таким чином, для точного визначення потужності тепловтрат необхідно проводити вимірювання не тільки температур, але і витрат теплоносія на початку і кінці ділянки і визначати час проходження ділянки теплоносієм.

При відносно невеликій зміні температури, характерній для теплотрас, теплоємність  $c_v$  можна вважати постійною. При постійній витраті теплоносія  $g_{M1} = g_{M2} = g$  тривалості проходження ділянки є рівними:  $\Delta\tau_1 = \Delta\tau_2 = \Delta\tau$ . у цьому простому випадку обчислення тепловтрат може бути виконано за формулами:

- потужність інтегральних тепловтрат на ділянці:

$$Q_{ТВ} = (T_1 - T_2) \cdot g \cdot c_v, \quad (2)$$

- питомі тепловтрати (на одиницю довжини трубопроводу):

$$Q_{ПИТ} = Q_{ТВ} / L, \quad (3)$$



де  $L$  – довжина ділянки;

$T_1$  – середня температура теплоносія на початку ділянки за час від  $\tau_1$  до  $\tau_2$  ;

$T_2$  – середня температура теплоносія в кінці ділянки за час від  $(\tau_1 + \Delta\tau)$  до  $(\tau_2 + \Delta\tau)$ .

Співвідношення (2) дозволяє достовірно визначати тепловтрати тільки в разі прецизійних вимірювань різниць середньої температури теплоносія на початку і кінці ділянки. Для проведення таких вимірювань необхідне створення відповідної апаратури, яка дозволяє з необхідною точністю проводити вимірювання під час експлуатації теплотраси.

#### **Апаратура для визначення різниці температури теплоносія на базі занурюваних перетворювачів.**

Раніше була розроблена прецизійна апаратура ІМРТ-1 і відповідна методика вимірювань, призначені для визначення перепаду температури теплоносія, що виникає внаслідок тепловтрат через теплоізоляцію на ділянці теплової мережі [2...4], яка оснащена спеціальними гільзами для встановлення термометрів.. Створений комплекс приладів «Траса», що дозволяє крім температури теплоносія на початку і кінці ділянки, додатково вимірювати температуру повітря і ґрунту [3]. У комплекси апаратури ІМРТ-1 і «Траса» входять по дві ідентичні вимірювальні станції, калібрувальний термостат з набором еталонних ртутних термометрів і програмне забезпечення для ПК. Кожна вимірювальна станція містить перетворювачі температури (ПТ) і спеціалізований вимірювальний пристрій (ВП). Нажаль, більшість ділянок теплотрас не обладнані гільзами для встановлення занурюваних перетворювачів температури (термометрів).

#### **Апаратура для визначення різниці температури теплоносія на базі накладних перетворювачів.**

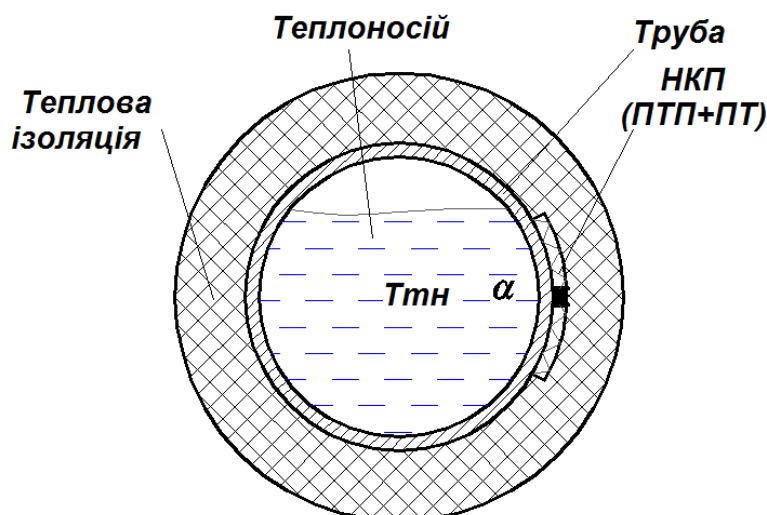
Розглянута вище апаратура може застосовуватися для визначення тепловтрат на ділянках теплотрас, обладнаних штатними гільзами в трубопроводах. Спроби використовувати термометри різних конструкцій для визначення температури теплоносія шляхом вимірювання температури зовнішньої поверхні труби виявилися безуспішними в зв'язку з тим, що похибки таких вимірювань сумірні або перевищують зниження температури теплоносія на ділянці теплотраси, викликане тепловтратами. Тому запропоновано створити спеціалізовані прилади, що дозволяють точно вимірювати температуру теплоносія на підставі спільних вимірів температури і теплового потоку на поверхні трубопроводу.

Пропонується використовувати накладний комбінований перетворювач (НКП) теплового потоку і температури, який виконаний у вигляді еластичної (гнучкої) намагніченої пластини, товщиною приблизно 2...3 мм. Така конструкція дозволить легко встановлювати перетворювач на металеву поверхню трубопроводу (рис.1).

НКП повинен містити два чутливих елемента: ПТ у вигляді малогабаритного високоомного платиного термометра опору і перетворювача теплового потоку (ПТП) типу допоміжної стінки з біметалічної гальванічної



спіралі термоелементів.



**Рисунок 1. Перетворювач НКП на металевій поверхні труби**

Результати спільних вимірів температури і теплового потоку на поверхні трубопроводу дозволяють визначати температуру теплоносія  $T_{тн}$  за формулою:

$$T_{тн} = T_{ВИМ} + q \cdot (R_K + R_{ТР} + R_{КОНВ}) \quad (4)$$

де  $T_{ВИМ}$  – виміряна температура поверхні труби;

$q$  – виміряна густина теплового потоку від поверхні труби;

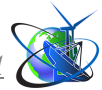
$R_K$  – тепловий опір контакту між ПТ та поверхнею труби;

$R_{ТР}$  – тепловий опір металевої стінки труби;

$R_{КОНВ}$  – тепловий опір конвективного теплообміну між теплоносієм і трубою.

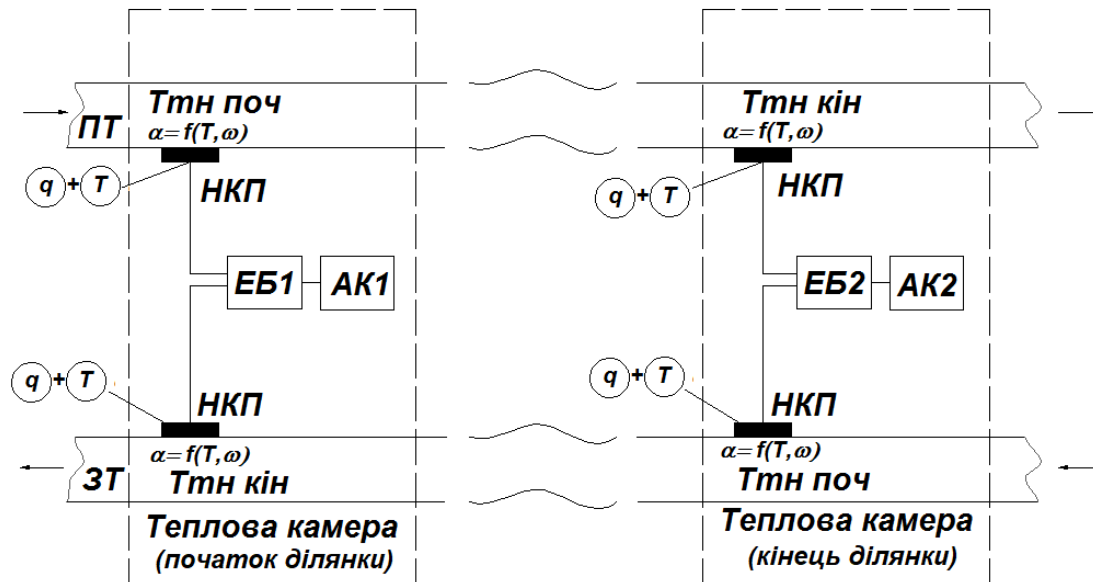
Тепловий опір контакту між ПТ та поверхнею труби  $R_K$  може бути зменшено і стабілізовано за рахунок застосування теплопровідних мастил. Тепловий опір металевої стінки труби  $R_{ТР}$  залежить від товщини і матеріалу стінки і може бути легко розрахований для всієї номенклатури використовуваних труб. Тепловий опір конвективного теплообміну між теплоносієм і трубою  $R_{КОНВ}$  є величиною, зворотною коефіцієнту теплообміну  $\alpha$ , який може бути розрахований за відомими формулами [5, 6] в залежності від швидкості руху теплоносія і його властивостей. Таким чином, значення всіх теплових опорів, що використовуються для розрахунку температури теплоносія в трубі, можна легко визначити за інформацією про тип труби, її температуру і швидкість руху теплоносія. Розрахунки показують, що значення поправок, зумовлених відмінністю виміряної температури поверхні труби і температури теплоносія, лежать в діапазоні від 0,05 до 0,5 К.

У комплект апаратури, крім накладних комбінованих перетворювачів НКП, повинні входити не менше двох електронних блоків, що дозволяють протягом 10 діб записувати сигнали первинних вимірювальних перетворювачів; калібрувальний термостат для звірення ПТ та визначення поправок до їх показаннями; персональний комп'ютер і відповідне програмне забезпечення.



Методика проведення випробувань полягає в наступному:

- встановлюють перетворювачі НКП з використанням теплопровідних мастил на очищену металеву поверхню труби виходу та повернення води на початку і кінці ділянки. Установку проводять на бічну поверхню труби для виключення впливу на результати вимірювання донних відкладень і бульбашок повітря. Поверх НКП встановлюють теплову ізоляцію (рис.2);



**Рисунок 2.** Схема розміщення і з'єднання елементів апаратури для проведення випробувань ділянки теплотраси: ПТ, ЗТ – прямий і зворотний трубопроводи, відповідно; НКП – накладний комбінований перетворювач теплового потоку і температури; ЕБ1, ЕБ2 – електронні блоки; АК1, АК2 – акумулятори.

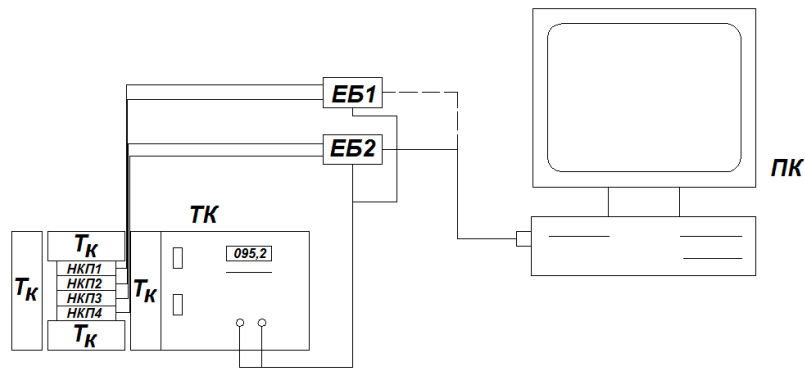
- підключають вихідні ланцюги НКП до електронних блоків (див. рис. 2) і протягом декількох діб проводять запис сигналів ПТ та ПТП;

- після закінчення випробувань проводять перезапис файлів накопиченої інформації з електронних блоків в персональний комп'ютер;

- проводять звірення перетворювачів температури НКП, для чого встановлюють їх в калібрувальний термостат з температурою, значення якої лежить в діапазоні проведених вимірювань, і визначають поправки до показань ПТ (рис. 3);

- вводять в комп'ютер значення поправок, а також інформацію про тип труби на випробуваній ділянці. З використанням наявного програмного забезпечення за тепловими мітками розраховують швидкість руху (витрату) теплоносія, розраховують значення теплових опорів, визначають значення температури теплоносія за (4) з урахуванням поправок, визначених при звірванні НКП;

- визначають різниці температури на початку і кінці випробуваної ділянки для теплоносія, що йде до споживача, та теплоносія, що йде від споживача, розраховують інтегральні і питомі тепловтрати на випробуваній ділянці.

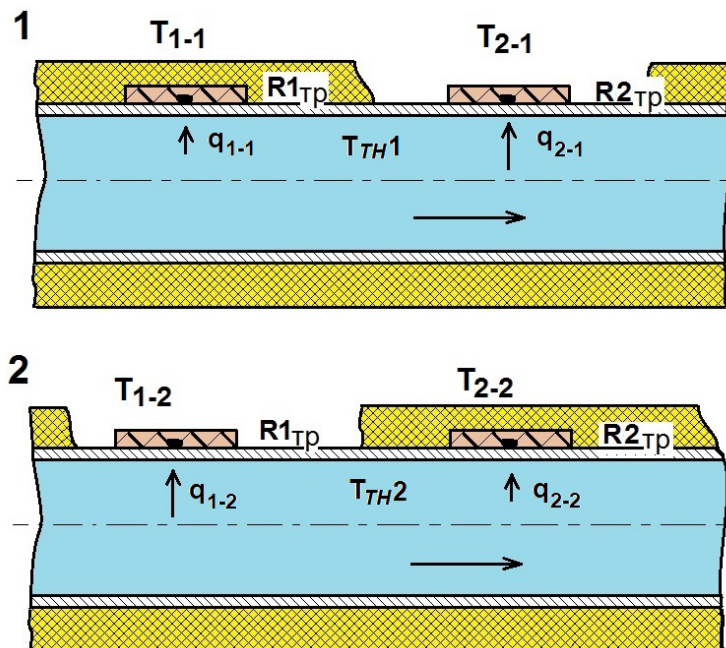


**Рисунок 3. Схеми розміщення та з'єднання елементів апаратури при виконанні звірення робочих НКП з еталонним термометром: НКП1 ... НКП4 – накладні комбіновані перетворювачі теплового потоку і температури; ЕБ1, ЕБ2 – електронні блоки; ТК – термостат калібрувальний,  $T_k$  – температура калібрування, ПК – персональний комп'ютер.**

**Метод двох вимірювань для визначення теплового опору стінки трубопроводу.**

Значення теплового опору стінки труби, яке входить у розрахункову формулу (4), може змінюватися у процесі експлуатації трубопроводу – збільшуватися внаслідок відкладення вапна, або зменшуватися внаслідок дії на стінку абразивних частинок у теплоносії. Використання для розрахунків неточного значення теплового опору призводить до збільшення похибки визначення температури теплоносія.

Для визначення сумарного теплового опору запропоновано метод двох вимірювань, який полягає у тому, що перед випробуваннями на початку та в кінці досліджуваної ділянки встановлюють на трубопровід по два комплекти поверхневих перетворювачів температури і теплового потоку (рис. 4).



**Рисунок 4. Ілюстрація до методу двох вимірювань для визначення сумарного теплового опору**



Проводять попередні вимірювання у двох режимах з суттєво різними значеннями теплового потоку через поверхневі накладні комбіновані перетворювачі, наприклад за наявності теплоізоляції на перетворювачі та за її відсутності.

За результатами вимірювань у двох режимах складають систему лінійних рівнянь теплопередавання крізь стінку трубопроводу:

$$\begin{aligned} T_{TH1} &= T_{1-1} + q_{1-1} \cdot R1_{TP} , \\ T_{TH1} &= T_{2-1} + q_{2-1} \cdot R2_{TP} , \\ T_{TH2} &= T_{1-2} + q_{1-2} \cdot R1_{TP} , \\ T_{TH2} &= T_{2-2} + q_{2-2} \cdot R2_{TP} , \end{aligned} \quad (5)$$

де  $T_{TH1}$ ,  $T_{TH2}$  - значення температури теплоносія при вимірюваннях у першому та другому режимах теплообміну перетворювачів;

$T_{1-1}$ ,  $T_{1-2}$  - значення температури, визначені першим перетворювачем у першому та другому режимах;

$T_{2-1}$ ,  $T_{2-2}$  - значення температури, визначені другим перетворювачем у першому та другому режимах;

$q_{1-1}$ ,  $q_{1-2}$  - значення теплового потоку, визначені першим перетворювачем у першому та другому режимах;

$q_{2-1}$ ,  $q_{2-2}$  - значення теплового потоку, визначені другим перетворювачем у першому та другому режимах;

$R1_{TP}$ ,  $R2_{TP}$  - тепловий опір стінки труби у місцях встановлення першого та другого перетворювачів.

Вирішення системи рівнянь (5) дозволяє визначити значення сумарного теплового опору у місцях встановлення перетворювачів.

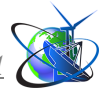
$$\begin{aligned} R1_{TP} &= \frac{q_{2,2}(T_{1,1} - T_{2,1}) + q_{2,1}(T_{2,2} - T_{1,2})}{q_{1,2} \cdot q_{2,1} - q_{1,1} \cdot q_{2,2}} \\ R2_{TP} &= \frac{q_{1,1}(T_{2,2} - T_{1,2}) + q_{1,2}(T_{2,1} - T_{1,1})}{q_{1,2} \cdot q_{2,1} - q_{1,1} \cdot q_{2,2}} \end{aligned} \quad (6)$$

У подальшому в ході випробувань знайдені значення застосовуються для визначення температури теплоносія відповідно до (4).

Розглянутий метод визначення теплового опору стінки труби розглянутий у статті [7], а також на нього отримано патент України на винахід [8].

Розглянуті методики та засоби дозволяють при режимі роботи теплотраси, близькому до експлуатаційного, визначати інтегральні і питомі тепловтрати на ділянках теплотрас, як обладнаних гільзами для термометрів, так і не обладнаних гільзами, при цьому не потрібно відключати споживачів теплоти.

Розглянутий метод визначення тепловтрат за результатами вимірювання зміни температури теплоносія та його витрати, по суті, відтворює принцип дії теплообмінного калориметра або теплотлічильника. Особливістю цього калориметру є те, що його елементи можуть бути на відстані між собою у



декілька кілометрів, а визначається не передана споживачу корисна енергія, а втрачена. Застосування перетворювачів теплового потоку у системах з накладним комбінованим перетворювачем демонструє можливість підвищення точності вимірювання теплообмінним калориметром за рахунок введення поправок на теплообмін.

### Висновки.

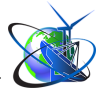
Запропоновані методики та розроблені структури вимірювальних засобів для визначення інтегральних і питомих тепловтрат на ділянках теплотрас, які дозволяють проводити вимірювання при режимі роботи теплотраси, близькому до експлуатаційного. Застосування перетворювачів теплового потоку у системі визначення тепловтрат з накладним комбінованим перетворювачем демонструє можливість підвищення точності вимірювання теплообмінним калориметром за рахунок введення поправок на теплообмін.

### Література

1. МУ 34-70-080-84. Методические указания по определению тепловых потерь в водяных и паровых тепловых сетях. Москва: СПО Союзтехэнерго, 1986. 72 с.
2. Грищенко Т. Г., Декуша Л. В., Беспрозванный А. А., Самокиш А. И., Воробьев Л. И., Гайдучек А. В., Ненюк А. Т. Контроль тепловтрат на участках теплотрасс. Энергетика и электрификация. 2000. №8. С. 44–48.
3. Воробйов Л. Й., Декуша Л. В., Трикоз П. І. Прилади контролю теплового стану тепломереж. Промисловості міста – інноваційний шлях розвитку: матеріали Київської міської наук.-практ. конф. Київ: ТОВ ДІА, 2002. С. 230–236.
4. Бабак В. П., Воробйов Л. Й., Декуша Л. В., Красильников О. І., Назаренко А. О., Полобюк Т. А. Система моніторингу втрат в тепломережах. Нова тема. 2012. № 1. С. 36.
5. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: справочник. Москва: Агропромиздат, 1979. 216 с.
6. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справочное пособие. Москва: Энергоатомиздат, 1990. 367 с.
7. Babak V., Dekusha O., Zaporozhets A., Vorobiov L., Kovtun S. (2023). Methods for Diagnosing the Technical Condition of Heating Networks Pipelines. In: Zaporozhets, A. (eds) Systems, Decision and Control in Energy IV. Studies in Systems, Decision and Control, vol 454. Springer, Cham. Pages 267-277. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-031-22464-5_15)
8. Патент України на винахід №124681. Спосіб визначення тепловтрат на ділянці теплотраси. Воробйов Л.Й.; Декуша Л.В.; Декуша О.Л.; Іванов С.О.; Ковтун С.І.; Грищенко Т.Г. Інститут технічної теплофізики НАН України. Опубліковано 27.10.2021, бюл. № 43/2021.

**Annotation.** The work considers the methods of experimental determination of heat losses on sections of heat pipelines. It is shown that in order to determine the heat loss, it is necessary to measure the flow rate of the coolant and its temperature at the beginning and at the end of the section. There are different types of flowmeters to determine the flow rate of the coolant, and





*precise thermometers with the possibility of long-term data recording are needed to determine the temperature. Briefly considered electronic thermometers for installation in collets on pipelines, which were created earlier. It is shown that the temperature of the coolant can be measured in the sections of pipelines that are not equipped with sleeves. The temperature of the coolant is calculated based on the results of measuring the temperature of the pipeline surface, taking into account the heat flow through the pipe wall and its thermal resistance. The use of an flexible combined heat flow and temperature converter is proposed and the method of determining the thermal resistance of the pipeline wall is described.*

**Key words:** *heat losses on pipelines, temperature, heat flow.*

Статья отправлена: 26.10.2024 г.

© Воробйов Л.Й, Декуша Л.В., Иванов С.О.