

УДК 681.121

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕЛИЧИН НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ
ТЕМПЕРАТУРИ ТЕПЛОНОСІЯ У ТРУБОПРОВОДАХ НАКЛАДНИМИ
ПЕРЕТВОРЮВАЧАМИ ТЕМПЕРАТУРИ¹⁾Головачов П. Г., ²⁾Коробко І. В., ³⁾Кротевич В. В.¹⁾ТОВ НВП “Техприлад”, Київ, Україна²⁾Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені
Ігоря Сікорського”, Київ, Україна³⁾ТОВ “ДП Укргазтех”, Київ, УкраїнаE-mail: petrogolov@gmail.com, i.korobko@kpi.ua, vitaly.krotevich@yahoo.com

Під час здійснення технологічних і виробничих процесів та контролю за режимами їх протікання виникають завдання визначення температури різних середовищ, що транспортуються трубопроводами, без врізування в них вимірювальних перетворювачів температури (ПТ), тобто із застосуванням накладних ПТ (НПТ). Такий спосіб дозволяє вимірювати механічні величини в ході технологічних процесів не порушуючи конструкції і не здійснюючи вплив на фізико-хімічні властивості вимірюваного середовища.

За допомогою НПТ можна реєструвати теплові втрати на ділянках теплотрас, ступінь забруднення внутрішніх стінок трубопроводів, контролювати справність каналів виміру температури теплоносія в теплолічильниках тощо.

У статті автори навели результати досліджень величини невизначеності вимірювання температури теплоносія у трубопроводах в системах теплопостачання за різних режимів його плинку. В першу чергу оцінювалась величина невизначеності результатів вимірювань, яка визначалась за результатами дослідження розрахункової моделі та натурних випробувань на діючих системах централізованого теплопостачання.

Зроблено акцент на оцінюванні різниці реєстрації температури в середині трубопроводу, визначеної врізними перетворювачами, і температури, визначеної накладними вимірювальними перетворювачами температури, з врахуванням градієнта температури по перерізу трубопроводу і якісних показників його теплоізоляції.

Визначено, що: температура, виміряна перетворювачами температури на поверхні трубопроводу в різних точках його периметру, при правильній їх установці та достатній термоізоляції не залежить від місця їх розташування; середня температура на поверхні трубопроводу, виміряна за допомогою розробленої методики установки ПТ, незначно відрізняється ($\Delta T \approx 0,3^\circ\text{C}$) від середньої температури теплоносія в середині потоку; перетворювачі температури мають високу відтворюваність вимірювань і малу відмінність у показаннях між каналами при паралельних вимірах ($\approx 0,03^\circ\text{C}$).

Обґрунтовано, що високі метрологічні характеристики перетворювачів температури дозволяють використовувати їх і для вирішення інших завдань: вимірювання розподілу теплових потоків у системах опалення житлових будівель для виконання гідравлічного балансування систем опалення та підвищення ефективності їх роботи; контролю забрудненості трубопроводів та теплообмінного обладнання для визначення необхідності їх промивання; визначення теплових опорів конструкцій будівель, що захищають, для оцінки їх енергоефективності; визначення коефіцієнтів корисної дії великих насосів калориметричним методом; для контролю правильності роботи каналів вимірювання температури теплолічильників та лічильників холоду; в інших галузях техніки, де потрібні вимірювання малих різниць температур з високою точністю.

Ключові слова: теплоносій; температура; вимірювальні перетворювачі температури; накладні вимірювальні перетворювачі; невизначеність; метрологічні характеристики.

Вступ

Під час контролю технологічних процесів виникають завдання визначення температури різних середовищ, що транспортуються в трубопроводах, без врізування в них вимірювальних перетворювачів температури (ПТ), тобто із застосуванням накладних ПТ (НПТ). Так, за допомогою НПТ можна реєструвати теплові втрати на ділянках теплотрас, ступінь забруднення внутрішніх стінок трубопро-

водів, контролювати справність каналів виміру температури теплоносія в теплолічильниках тощо.

Аналіз відомих технічних рішень

Найвні публікації щодо задач практичної і ефективно реєстрації температури теплоносія НПТ та можливості створення (і комплектації) вузлів обліку енергетичних носіїв з розширеними функціональними та експлуатаційними можливостями в більшості мають інформаційно-рекламний

характер [1 - 3]. Однак певна кількість дослідників, здебільшого вітчизняних, присвятили свої праці зазначеним питанням та проблемам [4 - 7], в яких наводиться загальна інформація про сучасне обладнання індивідуальних теплових пунктів та засоби вимірювальної техніки і представлені основні аспекти економічної ефективності їх автоматизації. Широко доступна також досить велика кількість публікацій рекламного характеру, які присвячені означеним проблемам.

Метою роботи є оцінка методичної похибки при реєстрації температури на зовнішній поверхні трубопроводу порівняно із температурою теплоносія в середині трубопроводу.

Результати основного дослідження

Для побудови розрахункової моделі розглянемо, як відбувається теплопередача від нагрітого теплоносія (води) до навколишнього середовища. На рис.1 представлено фрагмент теплопроводу і характер розподілу температури уздовж осі X .

У більшості теплопроводів в системах централізованого тепlopостачання в якості теплоносія використовують воду із температурою у діапазоні від 40 до 130°C, що рухається зі швидкостями від 0,5 до 3 м/с, і гідродинамічний характер руху води, як правило, є турбулентним. При турбулентному русі води відбувається її інтенсивне перемішування і конвективний теплообмін зі стінкою трубопроводу, що призводить до досить високої сталості температури за перерізом ядра потоку.

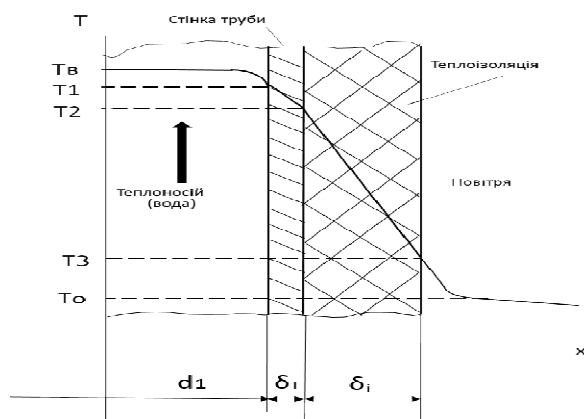


Рис. 1. Розподіл температури вздовж радіусу теплопроводу (вісь X), де: T_g – температура теплоносія; T_1, T_2 – температура на внутрішній і зовнішній стінках трубопроводу, відповідно; T_3 – температура на поверхні теплоізоляції; T_0 – температура навколишнього середовища (повітря); d_1 – внутрішній діаметр трубопроводу; δ_m – товщина стінки трубопроводу; δ_i – товщина теплоізоляції

Зміна температури спостерігається лише в тонкому приміжовому шарі біля внутрішньої стінки трубопроводу. Якщо забезпечити ідеальну теплоізоляцію трубопроводу, то тепловий потік через

стінку трубопроводу буде дуже малий і з допустимою похибкою можна вважати, що температура в середині потоку T_g і на внутрішній та зовнішній стінках трубопроводу T_1 і T_2 буде однаковою (рис. 1).

Для оцінки різниці температур $\Delta T = T_g - T_2$, яка буде характеризувати точність методу визначення середньої температури теплоносія в середині трубопроводу за показами НПТ на поверхні теплоізоляційного трубопроводу, необхідно скласти рівняння теплопередачі від теплоносія з температурою T_g у навколишнє повітряне середовище з температурою T_0 .

Тепловіддачу рідини (теплоносія) до внутрішньої стінки трубопроводу (густину теплового потоку q) можна визначити за законом Ньютона-Ріхмана [8]

$$q = \alpha(T_g - T_1), \quad (1)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі.

Коефіцієнт тепловіддачі розраховується за формулою

$$\alpha = \frac{Nu\lambda}{d_1}, \quad (2)$$

де Nu – число Нуссельта; λ – коефіцієнт теплопровідності.

Для нашого випадку, коли відбувається стаціонарний процес теплопередачі, та рух рідини має турбулентний характер, число Нуссельта визначається за виразом

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43}, \quad (3)$$

де Re – число Рейнольдса; Pr – число Прантля.

Розрахункові формули теплопередачі через циліндричні поверхні трубопроводу і теплоізолятора, що базуються на законі Фур'є, досить складні. Тому в нашому випадку, коли відношення внутрішнього діаметру трубопроводу до зовнішнього діаметру теплоізоляції більше ніж 0,5, з достатньою точністю (похибкою не більшою за 4 %) розрахунки можна здійснювати, застосовуючи формули для плоскої стінки

$$q = \frac{T_g - T_0}{\frac{1}{\alpha_g} + \frac{\delta_T}{\lambda_T} + \frac{\delta_I}{\lambda_I} + \frac{1}{\alpha_0}}, \quad (4)$$

де α_g, α_0 – коефіцієнти тепловіддачі для рідини та навколишнього середовища, відповідно; λ_T, λ_I – коефіцієнти теплопровідності для сталевий труби та утеплювача, відповідно; δ_T, δ_I – товщина стінки трубопроводу і товщина шару теплоізоляції, відповідно.

Коефіцієнт тепловіддачі для навколишнього середовища з природною конвекцією можна визначити за виразом [9]

$$\alpha_0 = 10,3 + 0,052(T_3 - T_0). \quad (5)$$

Температура на поверхні трубопроводу, яка реєструється НПТ, описується залежністю

$$T_2 = T_e - q \left(\frac{1}{\alpha_s} + \frac{\delta_T}{\lambda_T} \right). \quad (6)$$

При цьому, методична похибка вимірювання температури теплоносія НПТ описується виразом

$$\Delta T = q \left(\frac{1}{\alpha_s} + \frac{\delta_T}{\lambda_T} \right). \quad (7)$$

Для оцінювання величини ΔT за конкретних умов вимірювання здійснимо розрахунки, за наведеними вище формулами, виходячи з таких вихідних даних для трубопроводів із DN80 і DN500: швидкість теплоносія $w = 1$ м/с; трубопроводи з DN80 і DN500 мають, відповідно, внутрішні діаметри і товщини стінок $d_1 = 8,1 \cdot 10^{-2}$ м, $\delta_T = 3,9 \cdot 10^{-3}$ м і $d_1 = 0,516$ м, $\delta_T = 7 \cdot 10^{-3}$ м; кінематичну в'язкість води ν залежно від температури визначаємо за таблицею [7, 10]; коефіцієнт теплопровідності сталевих труби $\lambda_T = 51$ Вт/(м°C); теплоізоляція – спінений каучук з $\lambda_T = 0,038$ Вт/(м°C); товщина теплоізоляції $\delta_T = 36 \cdot 10^{-3}$ м; навколишнє повітряне середовище з температурою $T_0 = 20$ °С.

Перед початком розрахунків перевіримо характер руху води в трубопроводах різного діаметру за мінімальної температури теплоносія $T_e = 20$ °С, використовуючи формулу для розрахунку числа Рейнольдса

$$Re = \frac{w d_1}{\nu}, \quad (8)$$

де w – середня швидкість теплоносія; d_1 – внутрішній діаметр трубопроводу; ν – кінематична в'язкість води.

Число Рейнольдса для трубопроводу DN80 складе $Re = 8 \cdot 10^4$ і для DN500 $Re = 5 \cdot 10^5$, тобто характер руху води в обох трубопроводах – стійкий турбулентний.

Використовуючи вихідні дані, за формулою (7) побудовано графіки залежності T від температури теплоносія (рис. 2).

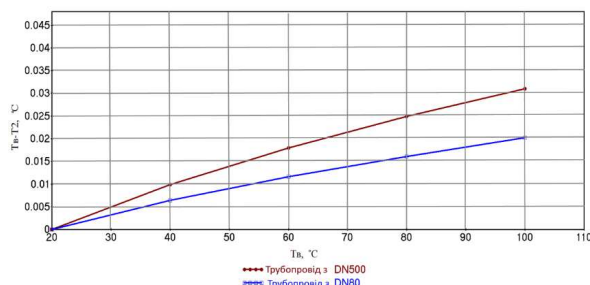


Рис. 2. Похибки вимірювання накладним термометром температури теплоносія залежно від його температури і діаметра трубопроводу при $\delta_i = 3,6 \cdot 10^{-2}$ і $\lambda_i = 3,8 \cdot 10^{-2}$ Вт/(м°C)

Теоретично отримана оцінка T не враховує ряд факторів, які можуть впливати на збільшення її значення: наявність накипу на внутрішній поверхні труби, тепловий опір контакту накладного датчика із поверхнею трубопроводу, кінцева довжина теплоізолятора накладного термометра та ін. Параметри утеплювача (λ_i , геометричні розміри) мають значний вплив на величину T , так за відсутності теплоізоляції накладного термометра і при $T_e = 80$ °С, значення T зростає в 10 разів.

У розглянутій вище моделі, передбачалося, що утеплювач має задану товщину δ_i і достатню довжину, при якій впливом крайових ефектів, пов'язаних з перетіканням тепла, можна знехтувати.

Для оцінки впливу кінцевої довжини утеплювача на величину T , розглянемо, як будуть розподілені теплові потоки в точці монтажу накладного термометра, що знаходиться на відстані L_0 від краю утеплювача. Теплопередачу від теплоносія по протяжності радіусу трубопроводу крізь утеплювач до навколишнього середовища можна знехтувати через великі значення теплового опору такого утеплювача. Передача теплоти буде відбуватися вздовж стінок трубопроводу від теплоізолюваної його частини до неізолюваної і далі в навколишнє середовище. У цьому випадку трубопровід можна розглядати як стрижень нескінченної довжини, зміна температури поверхні якого в напрямку краю утеплювача описується функцією [1]

$$\vartheta = \vartheta_0 e^{-ml}, \quad (9)$$

де ϑ – надлишкова температура поверхні трубопроводу на відстані l від місця монтажу накладного термометра; ϑ_0 – надлишкова температура поверхні трубопроводу в точці монтажу накладного термометра; m – температура охолодження/нагрівання

$$m = \sqrt{\frac{\alpha_s}{\lambda_T \delta_T}}. \quad (10)$$

Густина теплового потоку крізь поверхню трубопроводу без теплоізоляції q_{bi} визначається залежністю

$$q_{bi} = \frac{T_e - T_0}{\frac{1}{\alpha_s} + \frac{\delta_T}{\lambda_T} + \frac{1}{\alpha_o}}. \quad (11)$$

При цьому температура на поверхні трубопроводу складе

$$T_{2bi} = T_e - q_{bi} \left(\frac{1}{\alpha_s} + \frac{\delta_T}{\lambda_T} \right), \quad (12)$$

$$\vartheta_0 = T_2 - T_{2bi}. \quad (13)$$

З (9) випливає, що при значеннях $l = L_0 \approx \frac{4}{m}$

впливом краю утеплювача на покази накладного термометра можна знехтувати.

Проведемо оцінювання точності визначення температури енергоносія накладним термометром залежно від його відстані до краю утеплювача при $T_e = 100^\circ\text{C}$ і $T_o = 20^\circ\text{C}$ для діаметрів трубопроводів DN80 і DN500, використовуючи вищенаведені залежності (рис. 3).

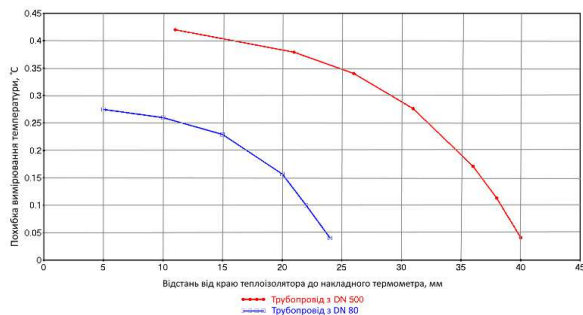


Рис. 3. Похибки вимірювання температури накладним термометром залежно від відстані до краю утеплювача

При $T_e = 100^\circ\text{C}$ і $T_o = 20^\circ\text{C}$ і довжині утеплювача для трубопроводів із DN80 і DN500 відповідно $24 \cdot 10^{-3}\text{ м}$ і $41 \cdot 10^{-3}\text{ м}$, внесок у методичну похибку вимірювання буде такий самий, як і від утеплювача при товщині $36 \cdot 10^{-3}\text{ м}$, $\lambda_i = 38 \cdot 10^{-3}\text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$. При цьому, сумарна методична похибка відповідно становитиме $45 \cdot 10^{-3}\text{ }^\circ\text{C}$ і $6 \cdot 10^{-2}\text{ }^\circ\text{C}$, тобто не перевищує похибки вимірювання перетворювачами температури із класом допуску $[\pm(0,3 + 0,005|t|)^\circ\text{C}]$.

Для перевірки методичної похибки вимірювання НТП теплоносія у трубопроводі проведено натурні випробування із використанням шестиканального цифрового термометра ВІРТ-6 із накладними перетворювачами температури.

Чутливі елементи цифрових вимірювальних перетворювачів температури (ТЦ) встановлювалися тріадами (по три: ТЦ 1, ТЦ 2, ТЦ 3 і ТЦ 4, ТЦ 5, ТЦ 6) під кутом $\pi/2\text{ рад}$ у верхній напівсфері без термопасти на ділянках трубопроводів, зачищених від фарби, та притискалися до трубопроводу еластичним силіконовим джгутом. Встановлені датчики термоізолювалися стрічкою спіненого каучуку до товщини теплоізолюючого шару $\delta_i \approx (30 \div 36) \cdot 10^{-3}\text{ м}$ і шириною) 0,1 м.

Перша серія вимірювань проводилася одночасно в котельні і в школі. Датчики ТЦ 1, ТЦ 2, ТЦ 3 встановлювалися на трубопроводі DN150 в котельні (рис. 4), а ТЦ 4, ТЦ 5, ТЦ 6 аналогічно встановлювалися на введенні в школу на трубопроводі DN80 (рис. 5). Вимірювання здійснювалися в автоматичному режимі окремо по об'єктах і дані передавалися на обчислювальний пристрій по радіо каналу (рис. 6, рис. 7). Паралельно з цими вимірюваннями, в ручному режимі вівся запис

показань температури із врізаного в трубопроводі DN150 датчика температури Pt100 (клас допуску В) теплолічильника SA94/1 (рис. 5).



Рис. 4. Накладні термометри в котельні на трубопроводі DN150

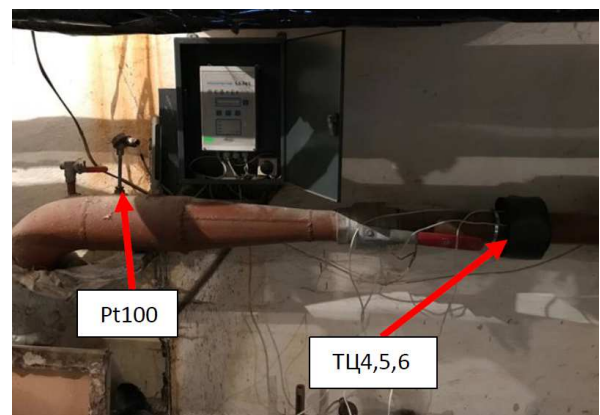


Рис. 5. Накладні термометри на трубопроводі DN80

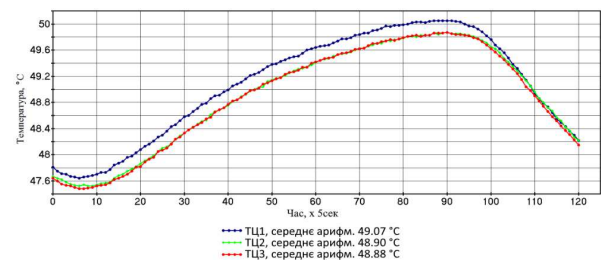


Рис. 6. Результати вимірювань накладними термометрами ТЦ 1, ТЦ 2, ТЦ 3 в котельні на трубопроводі DN150

Друга серія вимірювань проводилася в індивідуальному тепловому пункті житлового будинку. На трубопроводі DN25, що подає, встановлювалися ТЦ 1, ТЦ 2 та ТЦ 3, а на зворотному трубопроводі DN25 встановлювалися ТЦ 4, ТЦ 5 та ТЦ 6 (рис. 8 – рис. 10). Паралельно з цими вимірюваннями, в ручному режимі здійснювалась реєстрація показів температури з датчиків Pt100 (клас допуску В) теплолічильника Термо Форт-04.

Оцінюючи отримані результати (рис. 6 – рис. 8, рис.13 – рис. 14) можна зробити висновок,

що розташування ТЦ на трубопроводі практично не впливає на результати вимірів.

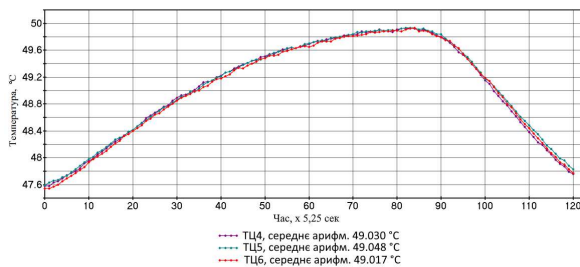


Рис. 7. Результати вимірювань накладними термометрами ТЦ 4, ТЦ 5, ТЦ 6 в школі на трубопроводі DN80

Відхилення середніх показань температури в різних серіях вимірювань між ТЦ 2-ТЦ 3 та між ТЦ 4, ТЦ 5 і ТЦ 6 знаходяться в межах 0,02-0,04°C. Варіаційний розмах між середніми значеннями ТЦ 1, ТЦ 2, ТЦ 3, якщо врахувати показання ТЦ 1, був у межах R=0,15- 0,19 °C (рис. 6, рис. 8, рис. 13), а між ТЦ 4, ТЦ 5, ТЦ 6 був у межах R = 0,031-0,08°C (рис. 7, рис. 14).

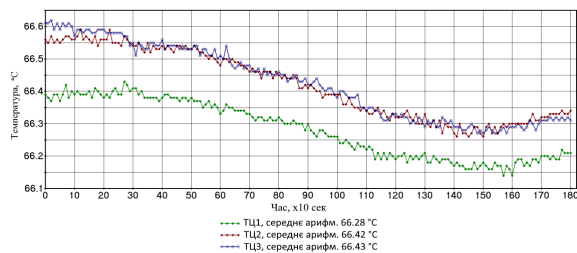


Рис. 8. Результати вимірювань накладними термометрами ТЦ 1, ТЦ 2, ТЦ 3 в житловому будинку на подавальному трубопроводі DN25

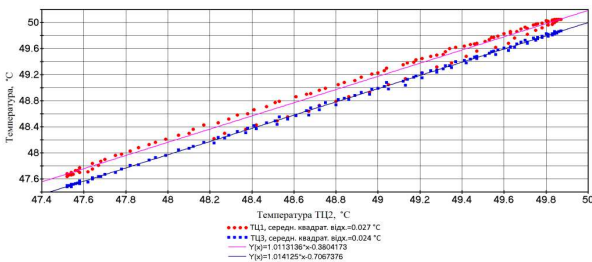


Рис. 9. Лінійна регресія між результатами вимірювань накладними термометрами ТЦ 2(X) і ТЦ 1,ТЦ 3 (Y) в котельні на трубопроводі DN150

Після проведення регресійного аналізу результатів вимірювань (рис. 6, рис. 8) отримано рівняння лінійної регресії Y(X), де дані ТЦ 2 прийняті за X, а Y дані ТЦ 1, ТЦ 3 (рис. 9, рис. 10). Аналогічний регресійний аналіз був проведений з даними, наведеними на (рис. 7, рис. 14), де дані ТЦ 4 прийняті за X, а за Y дані ТЦ 5,ТЦ 6 (рис. 11, рис. 12).

З графіків (рис. 6, рис. 8) видно, що показання

ТЦ 1 відносно ТЦ 2 і ТЦ 3 систематично відрізняються на величину, яка в кілька разів перевищує випадкову похибку їх вимірювань і призводить до підвищеного значення варіаційного розмаху R=0,15-0,19°C у тріаді вимірів ТЦ 1, ТЦ 2, ТЦ 3.

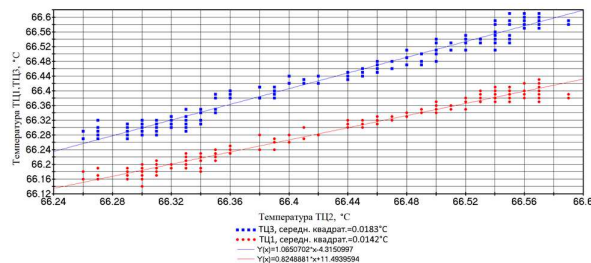


Рис. 10. Лінійна регресія меж результатами вимірювань накладними термометрами ТЦ 2 (X) і ТЦ 1,ТЦ 3 (Y) у житловому будинку на подавальному трубопроводі DN25

Крім цього, видно, що величина зміщення графіка показань ТЦ 1 змінюється в часі (рис. 6, рис. 8). Можливо це викликано нестабільною роботою ТЦ 1 та його неточним калібруванням. Тому надалі, при визначенні середньої температури на поверхні трубопроводу, показання ТЦ 1 не враховуватимемо.

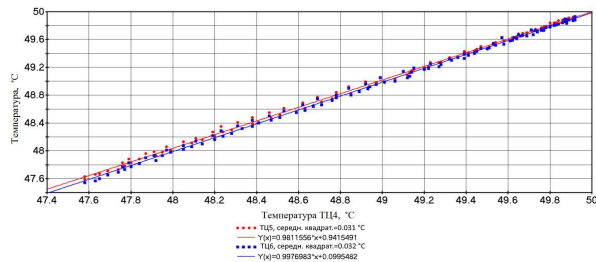


Рис. 11. Лінійна регресія меж результатами вимірювань накладними термометрами ТЦ 4(X) і ТЦ 5, ТЦ 6 (Y) у школі на трубопроводі DN80

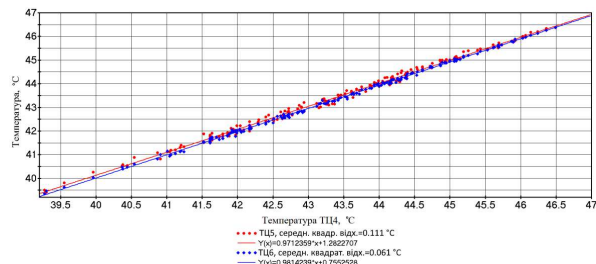


Рис. 12. Лінійна регресія меж результатами вимірювань накладними термометрами ТЦ 4(X) і ТЦ 5, ТЦ 6 (Y) у житловому будинку на зворотному трубопроводі DN25

Пилоподібний характер коливань температури теплоносія у зворотному трубопроводі із амплітудою ≈1°C (рис. 14) викликаний особливістю роботи автоматики контуру підігріву гарячої води, зворотний трубопровід якого підключений до за-

гального зворотного трубопроводу систем опалення та гарячого водопостачання.

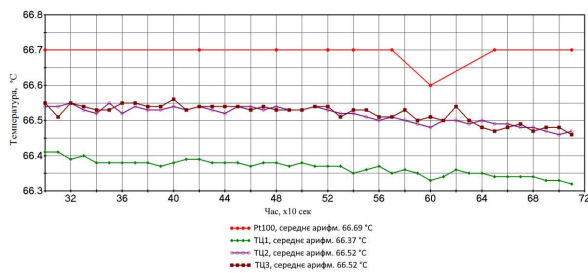


Рис. 13. Результати вимірювань температури теплоносія теплотічильником з датчиком температури Pt100 і накладними термометрами ТЦ 1, ТЦ 2, ТЦ 3 на подавальному трубопроводі DN80

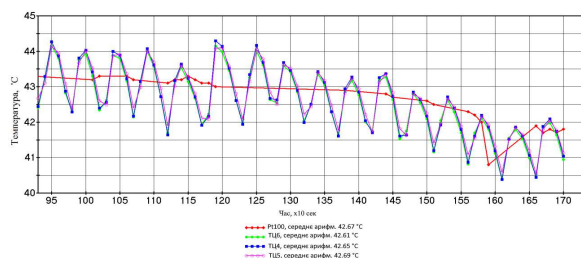


Рис. 14. Результати вимірювань температури теплоносія теплотічильником з датчиком температури Pt100 і накладними термометрами ТЦ 4, ТЦ 5, ТЦ 6 у житловому будинку на зворотному трубопроводі DN25

З графічних залежностей (рис. 14) видно, що ТЦ мають набагато меншу інерційність, ніж канали вимірювання температур теплотічильників із датчиками Pt100. Різниця між середньою температурою теплоносія, для результатів вимірювань за допомогою ТЦ та Pt100, становить: 1) $\Delta T = -0,17^\circ\text{C}$ за даними рис. 13; 2) $\Delta T = -0,02^\circ\text{C}$ за даними рис. 14; 3) $\Delta T = -0,52^\circ\text{C}$ за даними рис. 15.

З аналізу отриманих результатів (рис. 9 – рис. 12) випливає, що за малих у часі змін температури теплоносія $\approx 0,4^\circ\text{C}$, стандартні відхилення результатів вимірювань температури ТЦ знаходяться в межах: $\sigma = 0,014 - 0,018^\circ\text{C}$, а при змінах температури $\approx 2,6^\circ\text{C}$ стандартні відхилення результатів вимірювання температури ТЦ знаходяться в межах: $\sigma = 0,024 - 0,032^\circ\text{C}$ та при змінах температури $\approx 8^\circ\text{C}$ стандартні відхилення знаходяться в межах: $\sigma = 0,061 - 0,111^\circ\text{C}$.

Таким чином, що більше виражений нестационарний характер температури теплоносія, то більша випадкова похибка вимірювання накладними термометрами. Отримані дані дозволяють визначити необхідну тривалість інтервалу та кількість вимірювань, щоб отримати оцінку математичного сподівання температури теплоносія із заданою похибкою та довірчою ймовірністю.

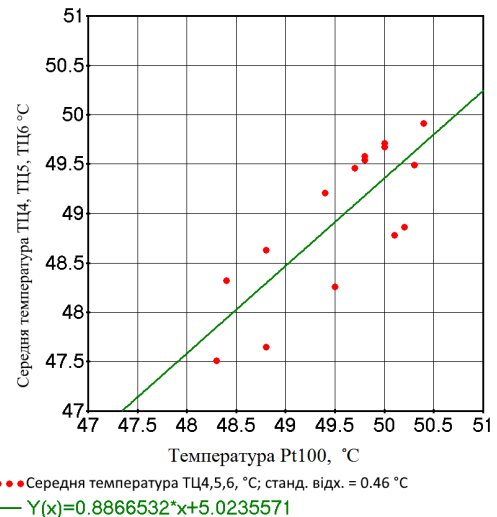


Рис. 15. Лінійна регресія між результатами вимірювань температури теплоносія теплотічильником з Pt100 та середньою температурою, вимірюваною накладними термометрами ТЦ 4(X) і ТЦ 5, ТЦ 6(Y) у школі на трубопроводі DN80

Висновки

Оцінюючи результати проведених досліджень, можна зробити такі висновки:

- температура, виміряна ТЦ на поверхні трубопроводу в різних точках його периметру, при правильній установці та достатній термоізоляції не залежить від місця їх розташування;
- середня температура на поверхні трубопроводу, виміряна за допомогою розробленої методики установки ТЦ, незначно відрізняється ($\Delta T \approx 0,3^\circ\text{C}$) від середньої температури теплоносія в середині потоку. Це дозволяє за допомогою накладних ТЦ без врізання в трубопроводу із допустимою точністю здійснювати вимірювання температури теплоносія;
- ТЦ мають високу відтворюваність вимірювань і малу відмінність у показаннях між каналами при паралельних вимірах ($\approx 0,03^\circ\text{C}$).
- встановлення в одному створі трьох датчиків ТЦ дозволяє проконтролювати якість їхньої установки і в 1,73 рази підвищує точність вимірювання середньої температури теплоносія;
- запропонований метод вимірювання температури накладними ТЦ дозволяє визначити різницю температур теплоносія на початку випробуваної теплотраси і в кінці, і знаючи витрату теплоносія, за допомогою статистичної обробки даних визначити з прийнятною точністю теплові втрати цієї ділянки теплотраси;
- високі метрологічні характеристики ТЦ дозволяють використовувати їх і для вирішення інших завдань: вимірювання розподілу теплових потоків у системах опалення житлових будівель для виконання гідравлічного балансування систем опалення та підвищення ефективності їх роботи;

контроль забрудненості трубопроводів та теплообмінного обладнання для визначення необхідності їх промивання; визначення теплових опорів захисних конструкцій будівель, для оцінки їх енергоефективності; визначення коефіцієнтів корисної дії великих насосів калориметричним методом; для контролю правильності роботи каналів вимірювання температури теплолічильників та лічильників холоду; в інших галузях техніки, де потрібні вимірювання малих різниць температур з високою точністю.

Література

- [1] В. М. Ванько, Є. С. Поліщук, М. М. Дорожовець, В. О. Яцук, Ю. В. Яцук, *Вимірювальні перетворювачі (сенсори): підручник*. Ред.: Є. С. Поліщук, В. М. Ванько. Нац. ун-т «Львів. політехніка». Львів, Україна, 2015.
- [2] М. В. Бурштинський, М. В. Хай, Б. М. Харчишин, *Давачі: навч. посіб.* Нац. ун-т «Львів. політехніка». Львів, Україна: ТзОВ «Простір М», 2014.
- [3] М. О. Гаврилюк, *Давачі систем автоматики: Навч. посіб. для студ. баз. напрямку*

«Комп'ютериз. системи, автоматика і упр.» Нац. ун-т «Львів. політехніка». Львів, Україна 2001.

- [4] В. В. Пырков, *Гидравлическое регулирование систем отопления и охлаждения: Теория и практика*. Киев, Украина: ДП «Такі справи», 2010.
- [5] В. В. Пырков, *Современные тепловые пункты. Автоматика и регулирование*. Киев, Украина: ДП «Такі справи», 2008.
- [6] В. Шафлик, *Современные системы горячего водоснабжения*. Киев, Украина: ДП ИПЦ «Такі справи», 2010.
- [7] E. Krasowski, I. Nikolenko, J. Gliński, A. Dashchenko, S. Sosnowski, *Hydraulics. Hydraulics machines*. Lublin: Polish Academy of Sciences Branch in Lublin, 2011.
- [8] М. А. Михеев, И. М. Михеева, *Основы теплопередачи*. Москва, СССР: Энергия, 1977.
- [9] Б. В. Яковлев, Ю. Б. Яковлев, *Теплофикация и тепловые сети*. Минск, 2003.
- [10] Ю. М. Константинов, О. О. Гіжа, *Технічна механіка рідини і газу*. Київ, Україна: Вища школа, 2002.

УДК 681.121

¹⁾ П. Г. Головачев, ²⁾ И. В. Коробко, ³⁾ В. В. Кротевиц

¹⁾ ТОВ НВП «Техприлад», Киев, Украина

²⁾ Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

³⁾ ООО «ДП Укргазтех», Киев, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕЛИЧИНЫ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТРУБОПРОВОДАХ НАКЛАДНЫМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ТЕМПЕРАТУРЫ

При осуществлении технологических и производственных процессов и контроле режимов их протекания, возникают задачи определения температуры разных сред, транспортируемых по трубопроводам, без врезания в них измерительных преобразователей температуры (ИПТ), то есть с применением накладных ИПТ (НИПТ). Такой способ позволяет измерять механические величины в ходе технологических процессов, не нарушая конструкции и не оказывая влияние на физико-химические свойства измеряемой среды.

Посредством НИПТ можно регистрировать тепловые потери на участках теплотрасс, степень загрязнения внутренних стенок трубопроводов, контролировать исправность каналов измерения температуры теплоносителя в теплосчетчиках и т.д.

В статье авторы привели результаты исследований величины неопределенности измерения температуры теплоносителя в трубопроводах систем теплоснабжения при разных режимах его течения. В первую очередь оценивалась величина неопределенности результатов измерений, определяемая по результатам исследования расчетной модели и натурных испытаний на действующих системах централизованного теплоснабжения.

Сделан акцент на оценке разности регистрации температуры внутри трубопровода, определенной врезными преобразователями, и температуры, определенной накладными измерительными преобразователями температуры, с учетом градиента температуры по сечению трубопровода и качественных показателей его теплоизоляции.

Определено, что температура, измеренная преобразователями температуры на поверхности трубопровода в разных точках его периметра, при правильной их установке и достаточной термоизоляции, не зависит от места их расположения; средняя температура на поверхности трубопровода, измеренная с помощью разработанной методики установки ИПТ, незначительно отличается ($\Delta T \approx 0,3^\circ\text{C}$) от средней температуры теплоносителя внутри потока; преобразователи температуры обладают высокой воспроизводимостью измерений и малой разницей в показаниях между каналами при параллельных измерениях ($0,03^\circ\text{C}$).

Обосновано, что высокие метрологические характеристики ИПТ позволяют использовать их и для решения других задач: измерение распределения тепловых потоков в системах отопления жилых зданий для выполнения

гидравлической балансировки систем отопления и повышения эффективности их работы; контроль загрязненности трубопроводов и теплообменного оборудования с целью определения необходимости их промывки; определение тепловых сопротивлений конструкций защищаемых зданий для оценки их энергоэффективности; определение коэффициентов полезного действия больших насосов калориметрическим методом; контроля правильности работы каналов измерения температуры теплосчетчиков и счетчиков холода; в других отраслях техники, где требуется измерение малых разностей температур с высокой точностью.

Ключевые слова: теплоноситель; температура; измерительные преобразователи температуры; накладные измерительные преобразователи; неопределенность; метрологические характеристики.

¹⁾Petro Golovachev, ²⁾Ivan Korobko, ³⁾Vitalii Krotevich

¹⁾ *Company Techprilad Eng. LLC, Kyiv, Ukraine*

²⁾ *National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine*

³⁾ *LTD "DP Ukgastech", Kyiv, Ukraine*

INVESTIGATION OF THE UNCERTAINTY VALUE AT MEASURING THE TEMPERATURE OF THE COOLANT IN THE PIPELINES WITH OUTSIDE SURFACE MOUNTED TEMPERATURE SENSORS

During performing technological and production processes and monitoring the modes of their operation, the problem of determining the temperature of various media transported through pipelines is solved without incut temperature sensors (TS) in them, i.e. with using outside surface mounted TS (SMTS). This method is allowing to measure mechanical values at technological processes without structure broken and without influence to physicochemical properties of measured media.

Using of SMTS possible to register heat losses on sections of heating mains, pollution degree of pipelines internal walls, to control serviceability of measurement channels of temperature of the coolant in heat meters, etc.

In the article authors presents results of research the uncertainty values for measuring of the coolant temperature in heating systems pipelines under different modes of its flow. First of all, the uncertainty value of the measurements results was estimated, which was determined by the results of the study for the calculation model and field tests at existing district heating systems.

Emphasis is paid on estimating the difference between the registration of temperature in the middle of the pipeline, determined by mortise transducers and the temperature measured by outside surface mounted temperature transducers, taking into account the temperature gradient across the pipeline and the quality of its insulation.

It is determined that: the temperature measured by temperature transducers on the surface of the pipeline at different points of its perimeter, with proper installation and sufficient thermal insulation does not depend on their location; the average temperature on the surface of the pipeline, measured using the developed method of installation of PT, slightly differs ($\Delta T \approx 0.3^\circ\text{C}$) from the average temperature of the coolant in the middle of the flow; temperature transducers have high reproducibility of measurements and small difference in readings between channels at parallel measurements ($0,03^\circ\text{C}$).

It is substantiated that high metrological performances of temperature transducers allow to use them for solving other tasks: measuring the distribution of heat fluxes in heating systems of residential buildings to perform hydraulic balancing of heating systems and increase their efficiency; estimate of contamination of pipelines and heat exchange equipment to determine the need for their washing; determination of thermal resistance of buildings protective structures to assess their energy efficiency; determination of large pumps efficiency by calorimetric method; checking the correct of operation the temperature measuring channels of heat meters and cold meters; in other technology areas where measurements of small temperature differences with high accuracy are required.

Keywords: heat carrier; temperature; temperature sensors; outside surface mounted sensors; uncertainty; meteorological performances.

*Надійшла до редакції
12 жовтня 2021 року*

*Рецензовано
15 листопада 2021 року*