

ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ВЕЛИЧИН

ПОХИБКИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ РІДИННИМИ ТЕРМОМЕТРАМИ У РАЗІ ЗМЕНШЕННЯ ЇХ ЛІНІЙНИХ РОЗМІРІВ

ERRORS OF MEASURING TEMPERATURE WHILE REDUCING LINEAR DIMENSIONS OF LIQUID-IN-TUBE THERMOMETERS

Яцишин С. П., д-р техн. наук, проф.; Мельник Х. Л., аспір.

Національний університет "Львівська політехніка", Україна; e-mail: hrustuna_levytska@ukr.net

Svyatoslav Yatsyshyn, Dr. Sc., Professor; Khrystyna Melnyk, PhD student

Lviv Polytechnic National University, Ukraine;

e-mail: hrustuna_levytska@ukr.net

<https://doi.org/10.23939/istcmtm2019.02.049>

Анотація. Наведено методологічні основи вивчення систематичної похибки вимірювання температури рідинними термометрами. Встановлено існування близько шести складових цієї похибки. Їхня відносна вага змінюється залежно від умов градування та застосування, особливостей виготовлення та використовуваних конструктивних матеріалів, їх сумісності та змочування. Показано, що зміна лінійних розмірів термометрів, зокрема їх зменшення до мікророзмірів, призводить до посилення одних складових та послаблення інших. Виведено рівняння руху термометричної рідини у капілярі з урахуванням низки параметрів. Доведено, що геометрія внутрішньої поверхні капіляра може ставати визначальною для формування складових систематичної похибки, зокрема складової так званого мертвого ходу, та іншої складової, зумовленої девіацією діаметра капіляра під час його виготовлення.

Ключові слова: рідинний термометр, систематична похибка, вимірювання температури, мікротермометр, девіація діаметра капіляра.

Abstract. The methodological bases for the study of the systematic error of temperature measurement by liquid-in-tube thermometers and microthermometers with diminution of the capillary diameter, that is, when passing from thermometers to microthermometers, in the field of predominance of gravitational forces over surface tension forces, are given. The existence of components of the systematic total error of temperature measurement with help of such thermometers is established with different thermometric liquids (water, mercury, alcohol). Their relative weight varies depending on the conditions of calibration and application, the peculiarities of manufacturing and used structural materials, their compatibility and wetting. It is shown that the change in the linear dimensions of the thermometers, in particular their reduction in micro size, leads to the strengthening of some components and the weakening of others. The equation of motion of a thermometric fluid in a capillary with a number of parameters is derived. It is shown that the geometry of the inner surface of the capillary can become a determining factor for the formation of the component of the systematic error of the so-called dead passage. The content of the two components of the systematic error due to the deterioration of the conditions of movement of the liquid in the capillary due to changes in its cross section is revealed. The value of the component of the systematic error, determined by the drop in the internal diameter of the capillary due to technological deviations in its manufacture, is estimated at the level of up to 1 %.

Key words: Liquid-in-glass thermometer, Systematic error, Temperature measurement, Microthermometer, Deviation of capillary diameter.

Вступ

Принцип дії скляних рідинних термометрів ґрунтується на розширенні термометричної рідини, що міститься в термометрі, залежно від температури. Скляний термометр із вкладеною шкалою складається зі скляного резервуара і припаяного до нього скляного капіляра. Уздовж капіляра розташована шкала, нанесена на пластину молочного скла. Температура вимірюваного середовища, у яке поміщені резервуар і частина капіляра, визначається за зміною об'єму термометричної рідини, відлічуваною за положенням рівня рідини в капілярі, відградуваному в градусах Цельсія. Оскільки одночасно із розширенням термометричної рідини відбувається також розширення резервуара і капіляра, фактично робимо висновки про температуру не за зміною

об'єму рідини, а за видимою зміною об'єму термометричної рідини у склі; видиме розширення рідини трохи менше від дійсного, що призводить до однієї з можливих складових похибки рідинного термометра.

Серед рідинних термометрів найпоширенішими вважають ртутні скляні термометри. Хімічно чиста ртуть як термометрична речовина характеризується низкою переваг: вона залишається рідиною у широкому інтервалі температур, не змочує скло, її легко отримати в чистому вигляді. Проте у ртуті порівняно малий температурний коефіцієнт об'ємного розширення, тому необхідно застосовувати тонкі капіляри. Верхня межа термометра (+600 °С) визначається характеристиками міцності скла. Оскільки температура кипіння ртуті за атмосферного тиску значно

нижча від цієї межі, у термометрах капіляр над ртуттю заповнюється інертним газом, наприклад, азотом. Щоб запобігти дії фактора пароутворення ртуті, тиск газу в капілярі повинен бути достатньо високим. Для термометрів із верхньою межею 600 °С тиск газу над ртуттю перевищує 3 МПа.

Скляні термометри з органічними термометричними рідинами застосовують в інтервалі температур від –200 до +200 °С. Однак ці рідини змочують скло і тому необхідно застосовувати капіляри із порівняно великим діаметром каналу.

Залежно від галузі застосування за методикою градування термометри поділяють на дві групи: термометри, які градууються за повного занурення, і термометри, які градууються за неповного занурення (як правило, за певної довжини занурення нижньої частини). Термометри першої групи застосовуються, як правило, у лабораторних умовах і дають змогу забезпечити вищу точність. Глибина їх занурення повинна змінюватися за зміни температури. Термометри другої групи – технічні – використовують для вимірювання температур у промисловості; глибина їх занурення повинна бути постійною. У зв'язку з цим конструктивно технічні термометри виконано так, що діаметр їх нижньої (“хвостової”) частини був істотно меншим від діаметра їх верхньої частини, у якій розташована шкала. Ці термометри занурюють у вимірюване середовище на глибину нижньої частини [1].

Недоліки

Промисловим рідинним термометрам притаманні різні види систематичних складових похибки. Однак зменшення їх лінійних розмірів, що вкрай необхідно для сучасних мікро- і нанотехнологій, зокрема у науці, промисловості, медицині тощо, спричиняє виникнення додаткових складових систематичної похибки вимірювання температури, що пов'язано як із технологіями їх виготовлення, так і з невідпрацьованістю практики їх застосування.

Мета роботи

Мета роботи полягає у дослідженні складових систематичної похибки рідинних термометрів у разі зміни їх визначальних розмірів від макро- до мікророзмірів.

Дослідження складових систематичної похибки рідинних термометрів

Відхилення характеристик термометрів від стандартних під час вимірювання температури призводить до розкиду градувань і часто спричинене незадовільним відпрацюванням технології виготовлення. Розкид особливо притаманний мікротермо-

метрам, що є дрібносерійними або унікальними сучасними термометрами, необхідними, наприклад, у медицині [2] для інтенсивного енергетичного втручання за допомогою електромагнітних полів.

1.1. Складові систематичної похибки

Однак кожному з них притаманна систематична похибка, що, своєю чергою, формується із низки незалежних складових. Останні вивчалися раніше, переважно на зразках термометрів, які унаслідок неперервної мініатюризації як технологій, так і засобів їх контролю потребують постійного удосконалення та вивчення. Адже, для прикладу [3], практично немає термометрів для вимірювання температури людських тканин у момент опромінення їх високочастотними полями (нагрівання ракових клітин до їх руйнування).

Запитання, що виникає, насамперед полягає у вивченні *першої складової систематичної похибки вимірювання*, зумовленої використанням співмірних за розмірами об'єктів та використаних для вимірювань термометрів. Воно, загалом, вирішене у [4], де показано, що ця складова визначається співвідношенням масорозмірних та теплофізичних характеристик.

Друга складова систематичної похибки спричинена незбігом умов градування і використання термометра. Якщо термометр градували з повним його зануренням у вимірюване середовище до позначки відліку, то на практиці він не перебуває у такому самому положенні (частина стовпчика може залишатись поза вимірюваним середовищем або ж він міститься у середовищі повністю, що також не відповідає умовам градування термометра). Це призводить до виникнення вищевказаної складової похибки, оскільки температури частини стовпчика, яка виступає, і частини, зануреної у вимірюване середовище, різні. Тому різним є розширення зануреної частини і частини рідини, що виступає, що й зумовлює цю складову похибки. Переважно ця складова істотна лише для мікротермометрів, суттєво менша за значення для мікротермометрів, а для нанотермометрів її важко описати взагалі.

Третьою складовою систематичної похибки, притаманною скляним рідинним термометрам, вважається зміщення нульової точки термометра. Воно спостерігається після нагрівання термометра до температур, близьких до верхньої межі вимірювання. Під час подальшого охолодження термометра до 0 °С скляний капіляр не відразу набуває тих самих розмірів, що до нагрівання. Тому термометрична рідина, наприклад, ртуть, об'єм якої починає дорівнювати початковому, частково розташовується в капілярі, перетин якого ще не зменшився до початкового. Зміщення нульової точки термометра може досягати значення 3 °С у технічних термометрах зі шкалою 0–600 °С.

Наступна **четверта складова систематичної похибки** (похибка від мертвого ходу) спричинена мікронерівностями всередині капіляра термометра, що призводить, насамперед, до затримки переміщення термометричної рідини у разі зміни температури, а далі до її стрибкоподібного руху. Зазначена похибка спостерігається навіть у макротермометрах, а саме у ртутних термометрах, де за рахунок сил поверхневого натягу під час вимірювання рідина реагує на зміни температури не плавно, а стрибкоподібно. Значення стрибка визначається пружними властивостями резервуара та діаметром капіляра. Термометрам з діаметром каналу менше ніж 50 мкм притаманний значний “мертвий хід”. Для зменшення складової похибки, спричиненої ним, достатньо потрусити термометр перед вимірюванням.

Ще одна – **п’ята із подібних складових систематичної похибки** – близька до попередньої: оскільки канал капіляра у рідинному термометрі може мати чітко виражену форму, наприклад, плавне звуження капіляра, зумовлене перегріванням скляної мікротрубки у момент виготовлення. Тут відсутня складова похибки, спричинена “мертвим ходом”, проте виникає саме така складова зміщення характеристики термометра внаслідок збільшення гідравлічного опору капіляра у цьому місці.

Щоб позбутися цих двох складових похибок (четвертої та п’ятої), необхідно особливо уважно спаювати капілярні трубки, після чого обігрівати місце спаю та сусідні з ним ділянки, потім охолоджувати й шліфувати канал капіляра зсередини. Вони посилюються з переходом від макро- до мікророзмірів капілярів.

Шоста складова з-поміж подібних складових систематичної похибки виникає у разі застосування методу інтерполяції для визначення поправок у проміжних точках шкали термометра, її у цій праці не розглядатимемо.

1.2. Оцінка складових систематичної похибки

1.2.1. Складова, зумовлена “мертвим ходом” термометричної рідини

Розглянемо детальніше останні дві складові систематичної похибки вимірювання температури рідинними термометрами, оскільки їх ще не вивчали методологічно, тим паче із прив’язкою до лінійних розмірів термометрів. Вони пов’язані із властивостями термометричних рідин, їх текучістю та переміщенням по капіляру під дією сил поверхневого натягу чи зовнішнього тиску, змочуванням стінок капіляра тощо.

Вимірювання основане на візуальному спостереженні зміни обсягу термометричної рідини. Відстань між позначками на шкалі прямо пропорційна до ємності резервуара термометра і різниці середніх коефіцієнтів теплового розширення термо-

метричної рідини і скла, з якого виготовлений резервуар термометра, та обернено пропорційна до квадрата діаметра каналу капіляра.

Для оцінювання складової систематичної похибки, спричиненої мертвим ходом, розглянемо рівняння руху термометричної рідини у капілярі реального мікротермометра.

Запишемо рівняння рівноваги сил, що діють на потік рідини у каналі капіляра, з урахуванням напрямку дії сил:

$$F_p - F_T - G \sin \alpha - F_{1ен} = 0, \quad (1)$$

де α – кут нахилу капіляра до горизонтальної площини. Сила тиску визначається як:

$$F_p = (\rho_1 - \rho_2)S, \quad (2)$$

де p_1, p_2 – тиск, відповідно, в перерізах капіляра; S – площа поперечного перерізу капіляра. Сила тертя становить:

$$F_T = \tau S_{пов} = \tau \pi dl = \tau \frac{Sl}{R_r}, \quad (3)$$

де τ – напруження тертя, $S_{пов} = \pi dl$ – площа внутрішньої поверхні капіляра, $R_r = S/\pi d$ – гідравлічний радіус капіляра. Проекція ваги рідини дорівнює: $G \sin \alpha = mg \frac{z_2 - z_1}{l} = (\rho Sl)g \frac{z_2 - z_1}{l} = \rho g S(z_2 - z_1)$, (4)

де m – маса рідини в капілярі між перерізами; z_2, z_1 – висота розміщення перерізів.

$$F_{1ен} = ma = (\rho Sl)a, \quad (5)$$

де a – прискорення руху рідини. З урахуванням (2) та (5) можна вивести вираз:

$$(p_1 - p_2)S - \tau \frac{Sl}{R_r} + \rho g S(z_1 - z_2) - (\rho Sl)a = 0. \quad (6)$$

Розділивши всі члени цього рівняння на $\rho g S$, отримаємо:

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho g} - \frac{\tau}{\rho g} \times \frac{1}{R_r} + (z_1 - z_2) - \frac{a}{g} l = 0. \quad (7)$$

Перепишемо рівняння у такому вигляді:

$$\left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g}\right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g}\right) = \frac{\tau}{\rho g} \times \frac{1}{R_r} + \frac{a}{g} l. \quad (8)$$

Це рівняння описує неусталений рух рідини з постійним прискоренням в капілярі сталого перерізу. Якщо врахувати, що різниця швидкісних напорів дорівнює нулю, то ліва частина в (8) є різницею повних гідравлічних напорів рідини, а права – сумою втрат напору з урахуванням тертя по довжині капіляра $h_{тер} = \frac{\tau}{\rho g} \times \frac{1}{R_r}$ та напору, що витрачається на подолання дії сили інерції $h_{ин} = \frac{a}{g} l$. Їх сума може

бути і додатною, за рівноприскореного руху, так і від’ємною, якщо рух рівносповільнений, оскільки інерційний напір підставляють зі знаком мінус. Як відомо, витрати на тертя по довжині капіляра можна розрахувати за формулою Дарсі [5]:

$$h_{\text{тер}} = \lambda \frac{l v^2}{d 2g}, \quad (9)$$

Для капіляра із $d = 4R_r$, можна виразити λ :

$$\lambda = \frac{4\tau}{\rho \frac{v^2}{2}}, \quad (10)$$

звідки стає зрозумілим зміст коефіцієнта гідравлічного опору: це – відношення почетвереного напруження тертя до динамічного тиску. Отже, зі зростанням останнього коефіцієнт гідравлічного опору зменшується.

Для визначення енергетичних причин руху, переміщення та зупинки термометричної рідини у капілярі мікротермометра розглянемо нижче енергетику процесу переміщення у зв'язку з процесами, якими вони супроводжуються.

Енергія стиснення рідини дорівнює роботі сили тиску F_x у поперечному перерізі капіляра S на відстань Δx , яка відповідає зміні об'єму рідини в трубопроводі внаслідок підвищення тиску:

$$E_{\text{ст}} = F_x \Delta x = \frac{1}{2} \Delta p S \Delta x = \frac{\Delta p \Delta V}{2}, \quad (11)$$

де ΔV – зміна меніска рідини в капілярі внаслідок стиснення. Зміну об'єму рідини можна визначити через модуль об'ємної пружності рідини K :

$$\Delta V = V \frac{\Delta p}{K}. \quad (12)$$

Тоді

$$E_{\text{ст}} = V \frac{\Delta p^2}{2K}. \quad (13)$$

Енергія деформації стінок дорівнює добутку сили F_r (на внутрішній поверхні капіляра) на відстань Δh , яка відповідає реальній деформації стінок капіляра:

$$E_{\text{деф}} = F_r \Delta h = \frac{1}{2} \Delta p 2\pi r^2 l \frac{\Delta h}{h} = \Delta p V \frac{\Delta h}{h}. \quad (14)$$

Згідно із законом Гука, відносна радіальна деформація стінок капіляра $\frac{\Delta h}{h}$, що виникає вна-

слідок підвищення тиску на Δp , дорівнює відношенню нормальних напружень у стінці капіляра σ до модуля Юнга матеріалу стінок капіляра E :

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{\sigma}{E} \quad (15)$$

З іншого боку, напруження в стінці капіляра, що виникли внаслідок підвищення тиску на величину Δp , можна визначити за формулою:

$$\sigma = \frac{\Delta p d}{2\delta}, \quad (16)$$

де d – діаметр капіляра, δ – товщина стінки капіляра.

З урахуванням (15)–(16) залежність для знаходження енергії деформації стінок капіляра набуває вигляду:

$$E_{\text{деф}} = V \frac{\Delta p^2 d}{2E\delta}. \quad (17)$$

Отримаємо:

$$\rho V \frac{v^2}{2} = V \frac{\Delta p^2}{2K} + V \frac{\Delta p^2 d}{2E\delta}. \quad (18)$$

Помноживши цей вираз на густину рідини, визначаємо з цього виразу значення приросту тиску Δp

необхідне для переміщення термометричної рідини у капілярі мікротермометра, тобто уточнюємо умови для усунення складової систематичної похибки, спричиненої “мертвим ходом”:

$$\Delta p = \rho v \left(\frac{\rho}{K} + \frac{\rho d}{\delta E} \right)^{-1/2} \quad (19)$$

1.2.2. Складова, спричинена неідеальністю внутрішнього діаметра капіляра

У капілярах радіусом r рівень змочування (незмочування) рідини вище (нижче) на висоту h описується формулою Жюрена [6]:

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{r \rho g}, \quad (20)$$

де ρ – щільність рідини; g – прискорення вільного падіння; θ – крайовий кут. У разі зміни радіуса каналу капіляра на Δr висота підняття рідини Δh зміниться на:

$$\Delta h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\Delta r \rho g}. \quad (21)$$

Проаналізуємо цей вираз. Наприклад, у разі зменшення діаметра капіляра рідина піднімається вище на Δh . Оцінимо зміну показів мікротермометра за наявності подібних відхилень у радіусі отвору капіляра.

Тиск у капілярі залежить від форми його меніска. У випадку ввігнутої (опуклої) поверхні він менший (більший), ніж над плоскою поверхнею, на значення ΔP_M :

$$\Delta P_M = \frac{\rho}{\rho_1 - \rho} P_{r_m}, \quad (22)$$

де ρ – щільність насиченої пари; ρ_1 – щільність рідини; P_{r_m} – додатковий тиск, пов'язаний із кривизною поверхні. В разі переміщення рідини із ширшої частини каналу капіляра до вузької капіляр викривлюється: вводимо поняття гідравлічного радіуса капіляра, що визначається (рис. 1):

$$R_{r1} = S/\pi d. \quad (23)$$

Під час проходження термочутливою рідиною вузької ділянки каналу капіляра виникає інший гідравлічний опір:

$$R_{r2} = S/(\pi d + \Delta d). \quad (24)$$

Далі рідина виходить на розширену ділянку каналу капіляра з іншим гідравлічним радіусом:

$$R_{r3} = S/(\pi d - \Delta d). \quad (25)$$

Для подолання рідиною ділянки звуження каналу капіляра, тобто для піднімання стовпчика, рідині необхідно подолати такі чинники, як силу тертя F_T , проекцію ваги P . Задавши умову зупинки рідини в каналі капіляра, отримаємо відповідно необхідну для цього зміну (зменшення) внутрішнього радіуса капіляра на ΔR_r :

$$\Delta R_r = -\frac{S}{\Delta d}. \quad (26)$$

Таблиця 1

Вплив зміни радіуса внутрішньої поверхні капіляра Δr (за крайового кута $\theta=0^\circ$ та радіуса капіляра $r = 500$ мкм) на підняття термометричної рідини Δh у ньому

Table 1

Effect of changing the radius of the inner surface of the capillary Δr (at the edge angle of wetting $\theta = 0^\circ$ and capillary's radius $r = 500 \mu\text{m}$) on the raising of the thermometric fluid Δh in it

Термометрична рідина – вода					
Δr_1 , мкм	Δh_1 , мкм	Δr_2 , мкм	Δh_2 , мкм	Δr_3 , мкм	Δh_3 , мкм
0,1	14,709	0,5	2,942	1	1,471
Термометрична рідина – спирт					
Δr_1 , мкм	Δh_1 , мкм	Δr_2 , мкм	Δh_2 , мкм	Δr_3 , мкм	Δh_3 , мкм
0,1	5,608	0,5	1,122	1	0,561
Термометрична рідина – ртуть					
Δr_1 , мкм	Δh_1 , мкм	Δr_2 , мкм	Δh_2 , мкм	Δr_3 , мкм	Δh_3 , мкм
0,1	7,076	0,5	1,415	1	0,7076

Таблиця 2

Відносна складова систематичної похибки рідинного термометра, спричинена девіацією внутрішнього діаметра капіляра

Table 2

Relative component of systematic error of liquid-in-glass thermometer, caused by deviation of inner diameter of capillary

Вода					
d_1 , мкм	δh_1 , %	d_2 , мкм	δh_2 , %	d_3 , мкм	δh_3 , %
1000	0,125	100	0,499	10	0,787
Ртуть					
d_1 , мкм	δh_1 , %	d_2 , мкм	δh_2 , %	d_3 , мкм	δh_3 , %
1000	0,141	100	0,496	10	0,705
Спирт					
d_1 , мкм	δh_1 , %	d_2 , мкм	δh_2 , %	d_3 , мкм	δh_3 , %
1000	0,112	100	0,235	10	0,561

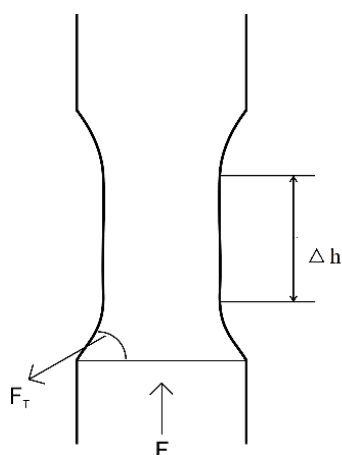


Рис. 1. Девіація розмірів капіляра рідинного термометра, спричинена коливаннями технологічних параметрів його виготовлення (зусилля розтягу, зміни температури, хімічного складу матеріалу)

Figure 1. Deviation of the size of the capillary of liquid-in-tube thermometer, due to fluctuations in its production parameters (tensile strength, temperature change, chemical composition of the material)

Якщо звуження каналу капіляра лінійне, то зупинка термочутливої рідини настає у момент, коли Δd набуває мінусових значень. За нелінійного звуження отримуємо $h_{\text{ідеал}}$.

У разі довготривалого звуження термометрична рідина піднімається вище по каналу капіляра. Коли рідина майже досягає межі підняття, звуження каналу капіляра діє як приріст опору і стовпчик зупиняється. Тоді виникає похибка, спричинена девіацією внутрішнього діаметра каналу капіляра:

$$\Delta h = h_{\text{ідеал}} - h_{R_{r3}} \quad (27)$$

Її оцінено у роботі для термометрів із капілярами різних діаметрів (рис. 2), причому для різних термометричних рідин термометрів (вода, ртуть, спирт).

Після переходу від абсолютних похибок до відносних отримуємо дані, наведені у табл. 2.

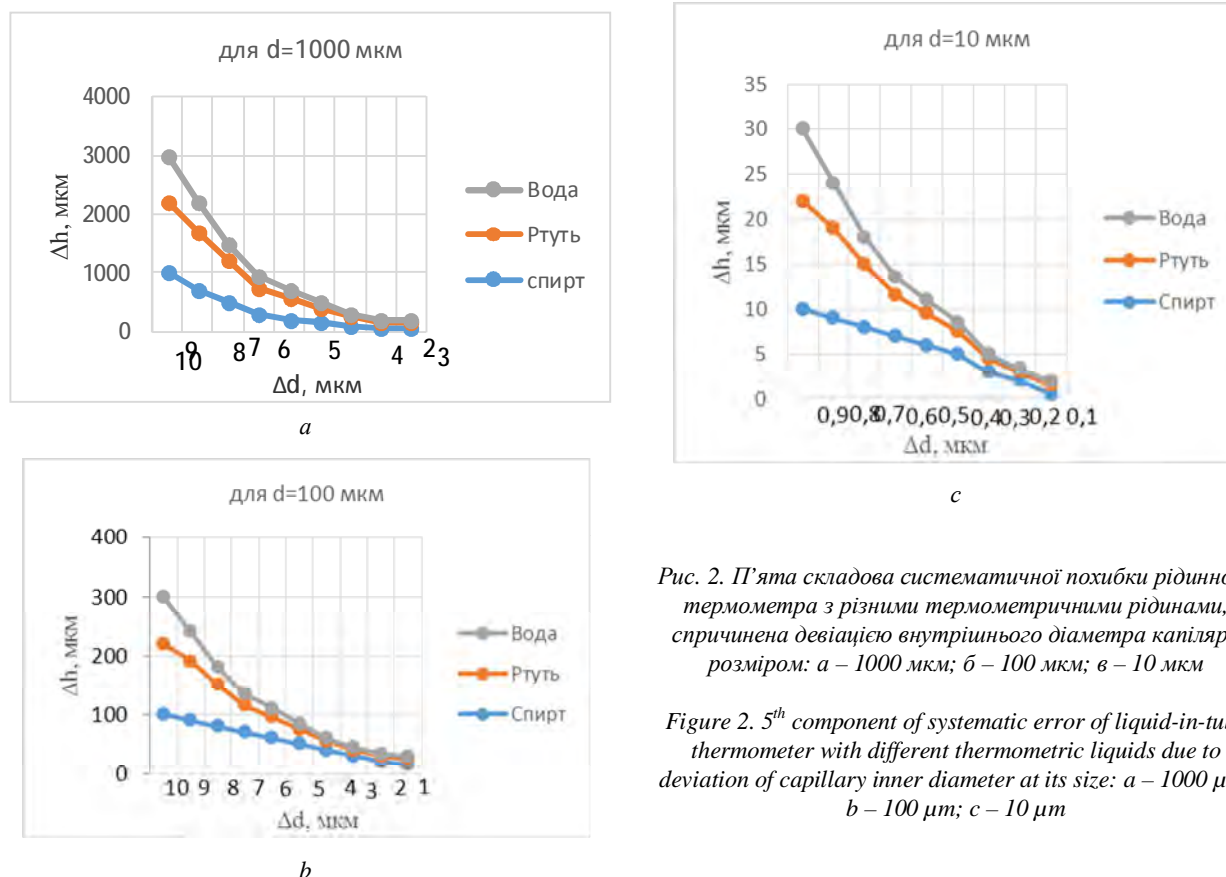


Рис. 2. П'ята складова систематичної похибки рідинного термометра з різними термометричними рідинами, спричинена дев'яцістю внутрішнього діаметра капіляра розміром: а – 1000 мкм; б – 100 мкм; в – 10 мкм

Figure 2. 5th component of systematic error of liquid-in-tube thermometer with different thermometric liquids due to deviation of capillary inner diameter at its size: а – 1000 μm ; б – 100 μm ; в – 10 μm

Висновки

У роботі досліджено метрологічні характеристики рідинних термометрів та мікротермометрів у разі зменшення діаметра капіляра, тобто в полі переважання гравітаційних сил над силами поверхневого натягу. Показано наявність принаймні шести складових систематичної похибки вимірювання температури такими термометрами із різними термометричними рідинами (вода, ртуть, спирт). Розкрито зміст двох складових систематичної похибки, спричинених погіршенням умов переміщення рідини в капілярі внаслідок перепадів його перерізу. Значення складової систематичної похибки, зумовленої перепадом внутрішнього діаметра капіляра внаслідок технологічних девіацій під час його виготовлення, оцінено на рівні до 1 %.

Подяка

Автори висловлюють вдячність колективу кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Національного університету "Львівська політехніка", Україна, за надану допомогу та всемірне сприяння у підготовці статті.

Конфлікт інтересів

Під час написання, підготовки та опублікування статті не виникало конфлікту інтересів, як і взаємних претензій співавторів.

Література

- [1] Я. Луцик, О. Гук, О. Лах, Б. Стадник, *Вимірювання температури: теорія та практика*, Україна. Львів: Бескид-Біт, 2006.
- [2] V. Zablotskii, O. Lunov, P. Gomez, "Magnetic heating by tunable arrays of nanoparticles in cancer therapy", *Acta Phys. Pol.*, vol. 115(1), pp. 413–417, 2009.
- [3] S. Yatsyshyn, B. Stadnyk, R. Samchenko, "CNT nanosensors in the tumors treatment", *Internat. Journ. Biosensors & Bioelectronics*, vol. 2, iss. 6, pp. 188–189, 2017.
- [4] B. Stadnyk, S. Yatsyshyn, Ya. Lutsyk, "Research in Nanothermometry. Part 3. Characteristics of the Thermometers with liquid- and solid-phase sensitive elements", *Sensors and Transducers*, vol. 140, iss. 5, pp. 15–23, 2012.
- [5] *Standard Handbook of Petroleum and Natural Gas Engineering*, Edited by: W. Lyons, G. Plisga, M. Lorenz, 3-rd Edition, 2016. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/book/9780123838469/standard-handbook-of-petroleum-and-natural-gas-engineering>
- [6] D. Quéré, F. Brochard-Wyart, P.-G. Gennes, "Capillarity and Gravity", in *Capillarity and Wetting Phenomena*. Springer, New York, pp. 33–67, 2004.

References

- [1] Ya. Lutsyk, O. Huk, O. Lah, B. Stadnyk. *Measurement of Temperature: Theory and Practice*. Ukraine. Lviv: Publishing House "Beskyd-Bit", 2006.
- [2] V. Zablotskii, O. Lunov, P. Gomez, "Magnetic heating by tunable arrays of nanoparticles in cancer therapy", *Acta Phys. Pol.*, vol. 115(1), pp. 413–417, 2009.

[3] S. Yatsyshyn, B. Stadnyk, R. Samchenko, “CNT nanosensors in the tumors treatment”, *Internat. Journ. Biosensors & Bioelectronics*, vol. 2, iss. 6, pp. 188–189, 2017.

[4] B. Stadnyk, S. Yatsyshyn, Ya. Lutsyk, “Research in Nanothermometry. Part 3. Characteristics of the Thermometers with liquid- and solid-phase sensitive elements”, *Sensors and Transducers*, vol. 140, iss. 5, pp. 15–23, 2012.

[5] *Standard Handbook of Petroleum and Natural Gas Engineering*, Edited by: W. Lyons, G. Plisga, M. Lorenz, 3-rd Edition, 2016. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/book/9780123838469/standard-handbook-of-petroleum-and-natural-gas-engineering>

[6] D. Quéré, F. Brochard-Wyart, P.-G. Gennes, “Capillarity and Gravity”, in *Capillarity and Wetting Phenomena*, Springer, New York, NY, 2004, pp. 33–67.